



# Perspektiven Moderner Astrophysik

Silke Britzen

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn

<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/>

e-mail: [sbritzen@mpifr.de](mailto:sbritzen@mpifr.de)

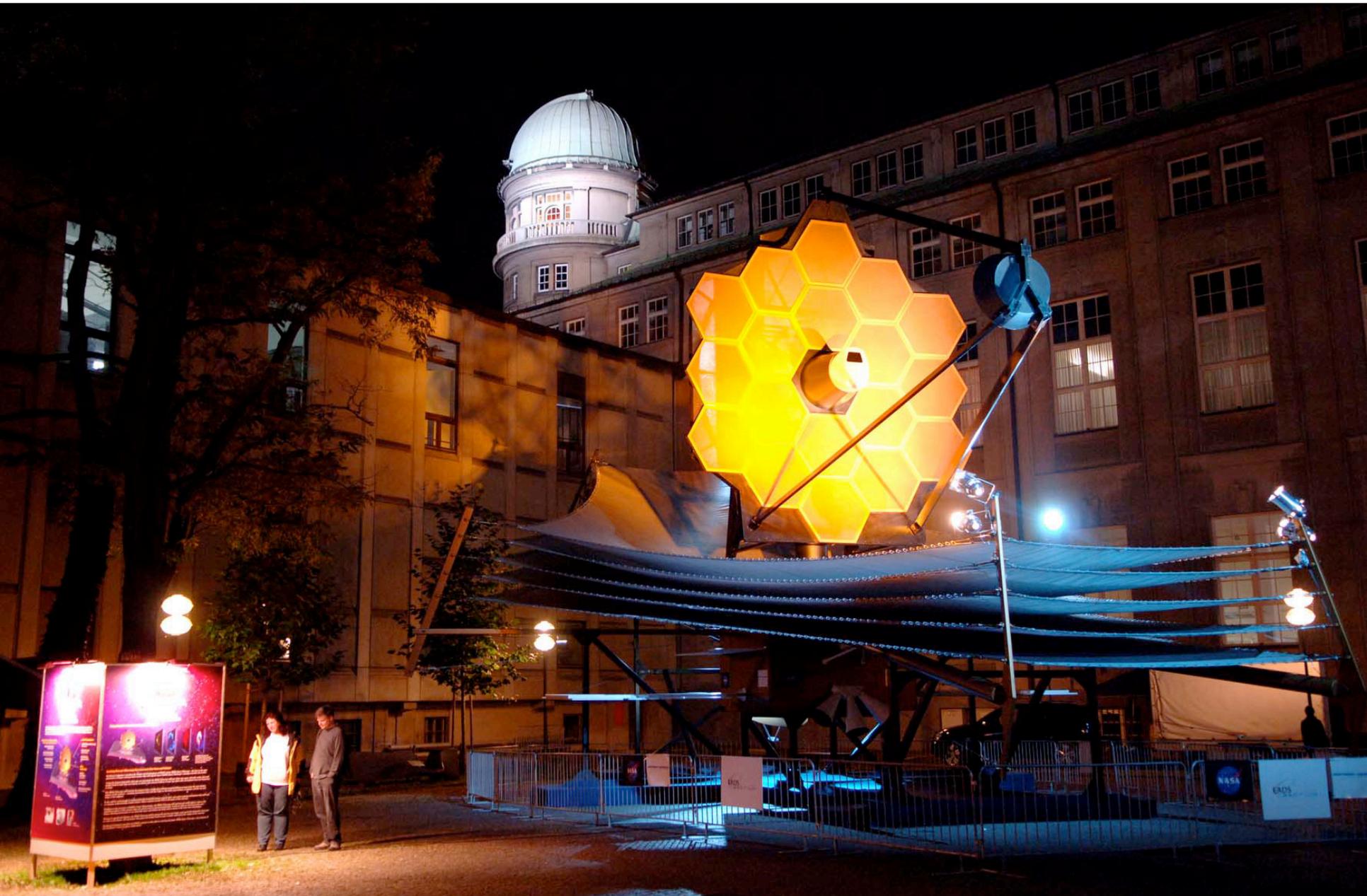
# Programm für das Sommersemester 2011

- 29.04. Überblick über die Themen des Semesters
- 13.05. Das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße
- 27.05. Vom Ereignishorizont ins Schwarze Loch
- 17.06. Gravitationswellen & Schwarze Löcher
- 01.07. Urknall – gibt es Alternativen?
- 15.07. Neues vom LHC? Higgs!

außerdem: Japan – Das Erdbeben und die (astronomischen) Auswirkungen

# Was aus der letzten Vorlesung an Fragen blieb & die Themen von heute

- JWST - kann das Teleskop das Galaktische Zentrum beobachten?
- Vom Ereignishorizont ins Schwarze Loch
- Hawking radiation
- Information loss problem
- Naked Singularities
- etc.





The James Webb Space Telescope (sometimes called JWST) is a **large, infrared-optimized space telescope**, scheduled for launch in **2014**. Webb will find the **first galaxies** that formed in the early Universe, connecting the Big Bang to our own Milky Way Galaxy. Webb will peer through dusty clouds to see **stars forming planetary systems**, connecting the Milky Way to our own Solar System. Webb's instruments will be designed to work primarily in the infrared range of the electromagnetic spectrum, with some capability in the visible range.

Webb will have a **large mirror, 6.5 meters** (21.3 feet) in diameter and a **sunshield the size of a tennis court**. Both the mirror and sunshade won't fit onto the rocket fully open, so both will fold up and open once Webb is in outer space. Webb will reside in an **orbit about 1.5 million km (1 million miles) from the Earth**.

The James Webb Space Telescope was named after a former NASA Administrator.

# JWST resolution and science

- Webb has four main science themes: The End of the Dark Ages: First Light and Reionization, The Assembly of Galaxies, The Birth of Stars and Protoplanetary Systems, and Planetary Systems and the Origins of Life.

Webb will have an angular resolution of somewhat better than **0.1 arc-seconds** at a wavelength of 2 micrometers (one degree = 60 arc-minutes = 3600 arc-seconds). Seeing at a resolution of 0.1 arc-second means that Webb could see details the size of a US penny at a distance of about 24 miles (40 km), or a regulation soccer ball at a distance of 340 miles (550 km).

# Literatur

## Schwarze Löcher

Die dunklen Fallen der Raumzeit  
Andreas Müller

Developments in General  
Relativity: Black Hole  
Singularity and Beyond

I.D. Novikov, J. M. Vej, 2003,  
arXiv:gr-qc/0304052v2

## Naked Singularities

Pankaj S. Joshi  
Scientific American

# Fragen über Fragen

- Wie entsteht eine Singularität ?
- Kann ein fallender Beobachter die Singularität durchqueren, ohne zerlegt zu werden? **Ja??**
- Warum ist es so schwierig zu sagen, was sich in einem SL befindet ?
- In welcher Form liegt die Materie vor ? Gibt es noch Materie ?
- Kann sich irgendetwas im Innern aufhalten / überleben ? Wie lange? Gibt es ein Zurück ?
- Kann man das Innere eines SL sehen ? **Ja??**
- Wie kommt man an die Informationen ?
- Was weiß man überhaupt ?

A black hole with a glowing accretion disk and a bright ring of light. The central black hole is dark and surrounded by a bright, glowing ring of light. The accretion disk is composed of glowing blue and purple gas, with bright yellow and orange spots. The background is a dark blue and purple space with some distant stars.

Vom Ereignishorizont ins  
Schwarze Loch

# Das Schwarze Loch

- Die gesamte Masse stürzt im Zentrum des Objekts zusammen – an dieser Stelle wird die Krümmung der Raumzeit unendlich groß, ebenso die Werte für Temperatur und Dichte. Dabei entsteht eine punktförmige Singularität. Ähnliche Zustände herrschten auch im Urknall.
- Im rotierenden SL konzentriert sich die Materie in einer ringförmigen Singularität
- In welchem Zustand befindet sich die Materie im Innern?
- **Wir wissen es nicht!**

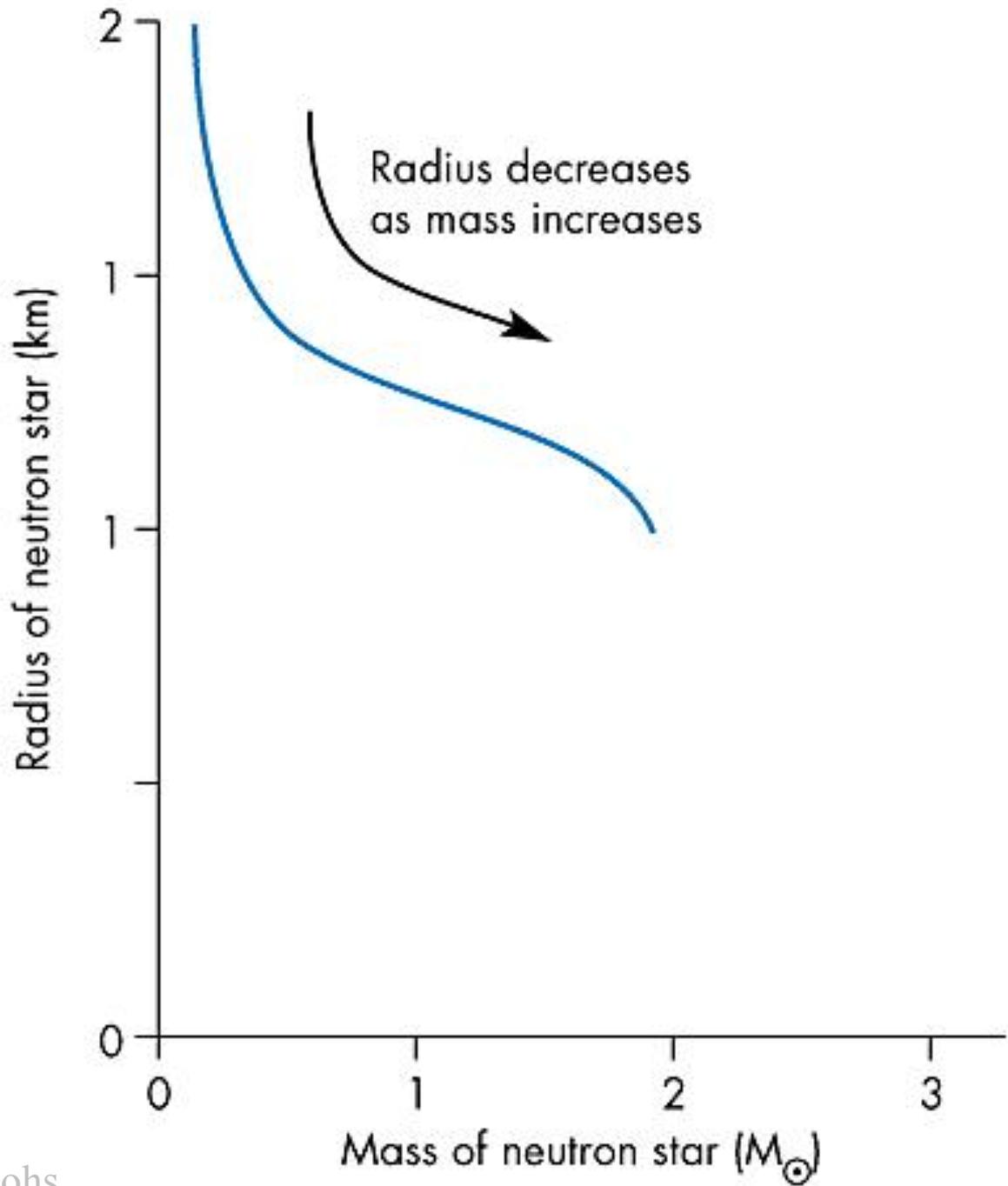
# Abschnitt 1: Der Ereignishorizont

Eigenschaften eines SL 's:

- Masse
- Drehimpuls (eventuell)
- Ladung (nur kleine SL 's)

Frage: Was ist der Unterschied zu anderen (kosmischen) Objekten?

Antwort: Die Masse liegt innerhalb des Schwarzschildradius in Form einer Singularität vor.



# Mass versus radius for a neutron star

Objects too heavy to be neutron stars collapse to black holes

# Abschnitt 4: Der Kollaps der Materie

Interstellare Staubwolken kollabieren, wenn sie den Virialsatz verletzen.

$$E_{kin} = E_{Pot} ; E_{kin} < E_{Pot} \Rightarrow \textit{Kollaps}$$

Stabilität durch Innendruck wird erst durch Kernfusion wieder erreicht.

Nach Kernfusion und komplizierten Übergängen läuft der Stern ins Endstadium.

Bei genügend großer Masse entsteht Weißer Zwerg. Materie wird metallisch, Elektronengas baut hohen Gegendruck auf.

Bei größerer Masse entsteht Neutronenstern. Inverser  $\beta$ -Zerfall „erzeugt“ Neutronen, Atome zerfallen zu einheitlicher Neutronenmaterie, Neutronen übernehmen Rolle der Elektronen, Druck steigt wieder an.

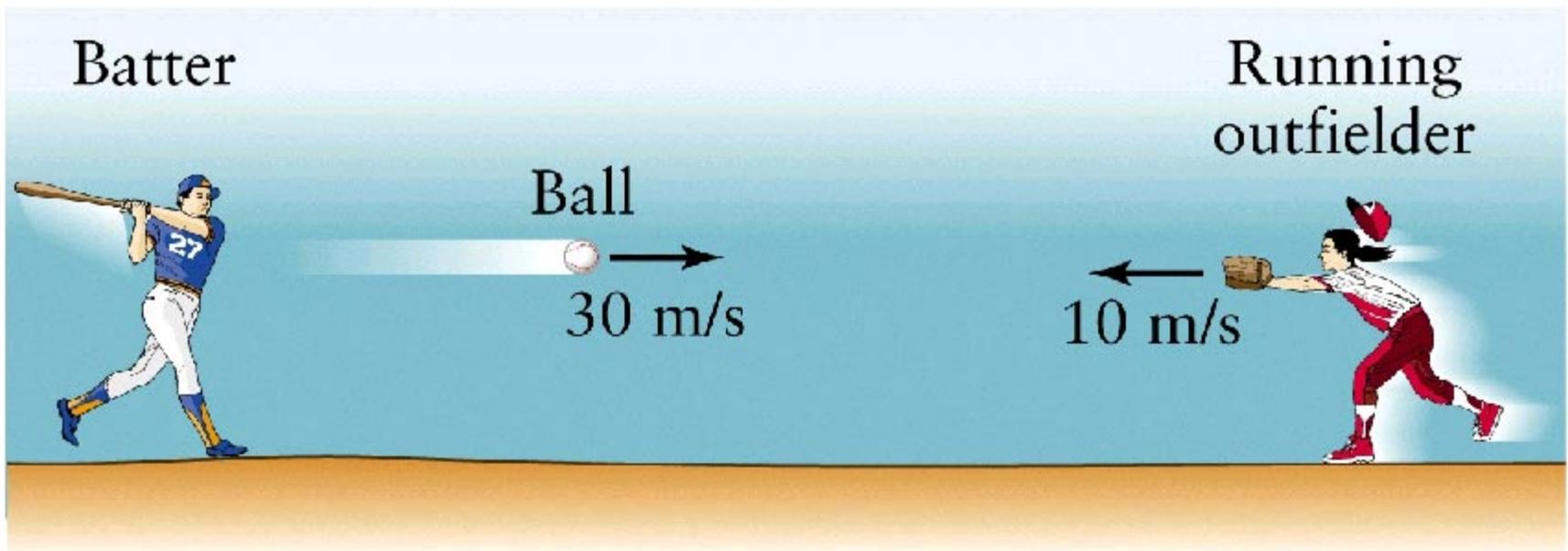
Bei noch größerer Masse nicht genug. Vor Erreichen des Horizonts tritt keine Stabilisierung mehr ein, danach ist keine mehr möglich.

## Abschnitt 4: Der Kollaps der Materie

Die Masse kollabiert zu einem Punkt, einer Singularität, „Masse ohne Materie“.

Hier liegt echte physikalische Singularität vor, die experimentell feststellbar ist für fallenden Beobachter.

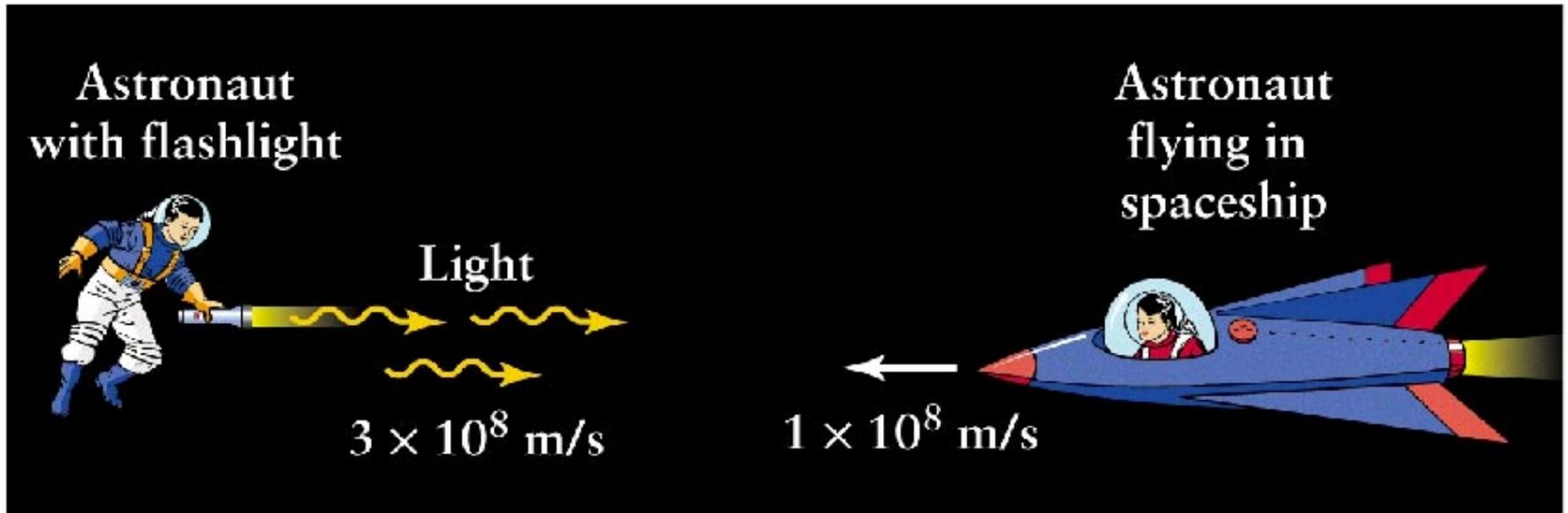
Dieses Endstadium ist unabhängig von der Verteilung der kollabierenden Masse, sie muss nicht sphärisch symmetrisch sein.



As seen by outfielder, ball is approaching her at  
 $(30 \text{ m/s}) + (10 \text{ m/s}) = 40 \text{ m/s}$

**a**

# Speed of light is constant



*Incorrect* Newtonian description:

As seen by astronaut in spaceship, light is approaching her at  $(3 \times 10^8 \text{ m/s}) + (1 \times 10^8 \text{ m/s}) = 4 \times 10^8 \text{ m/s}$

*Correct* Einsteinian description:

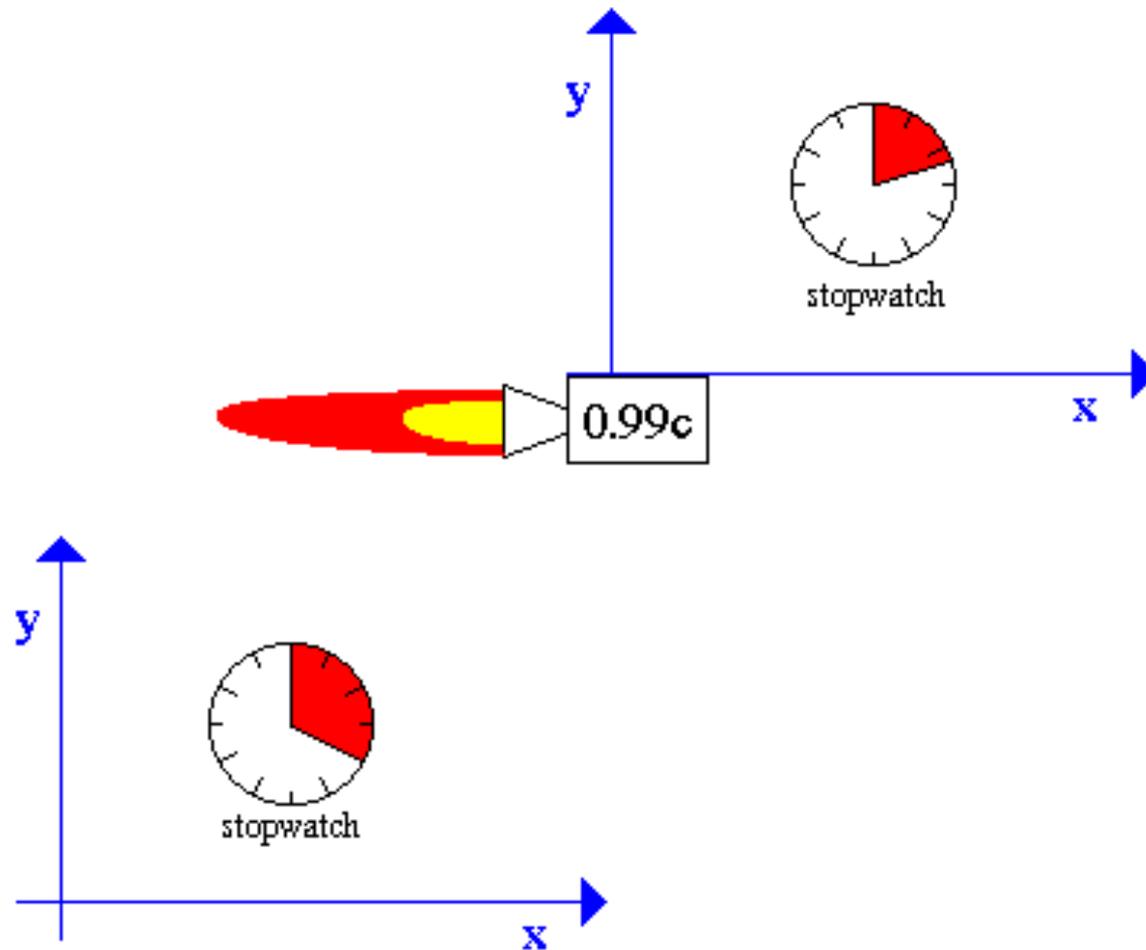
As seen by astronaut in spaceship, light is approaching her at  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

# Our conceptions of space and time has to be changed.

- Facts:
  - Regardless of speed or direction, observers always measure the speed of light to be the same value.
  - Speed of light is maximum possible speed.
- Consequences:
  - The length of an object decreases as its speed increases
  - Clocks passing by you run more slowly than do clocks at rest

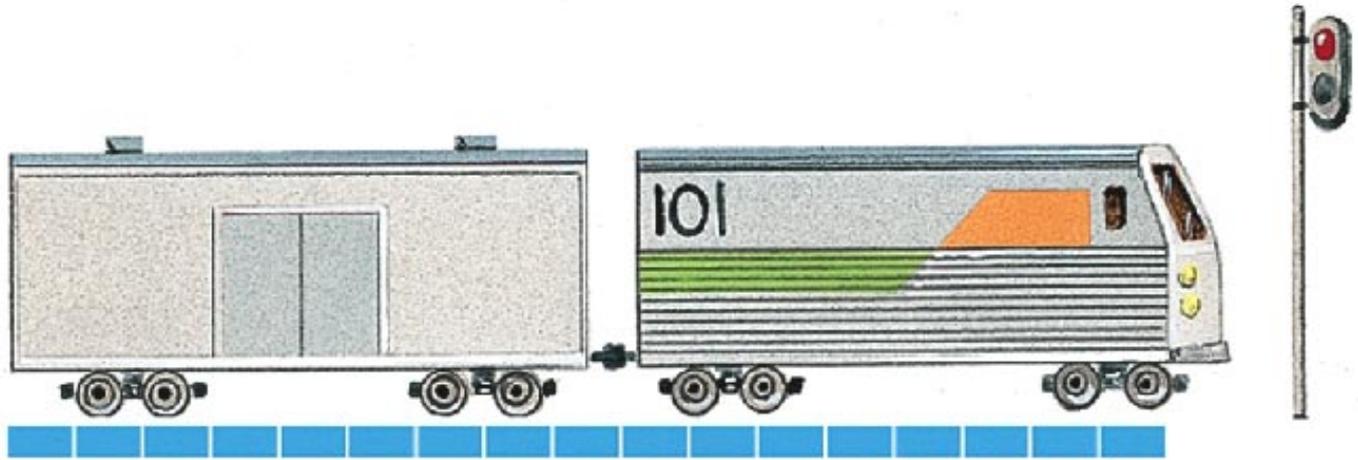
# Time dilation

Time Dilation

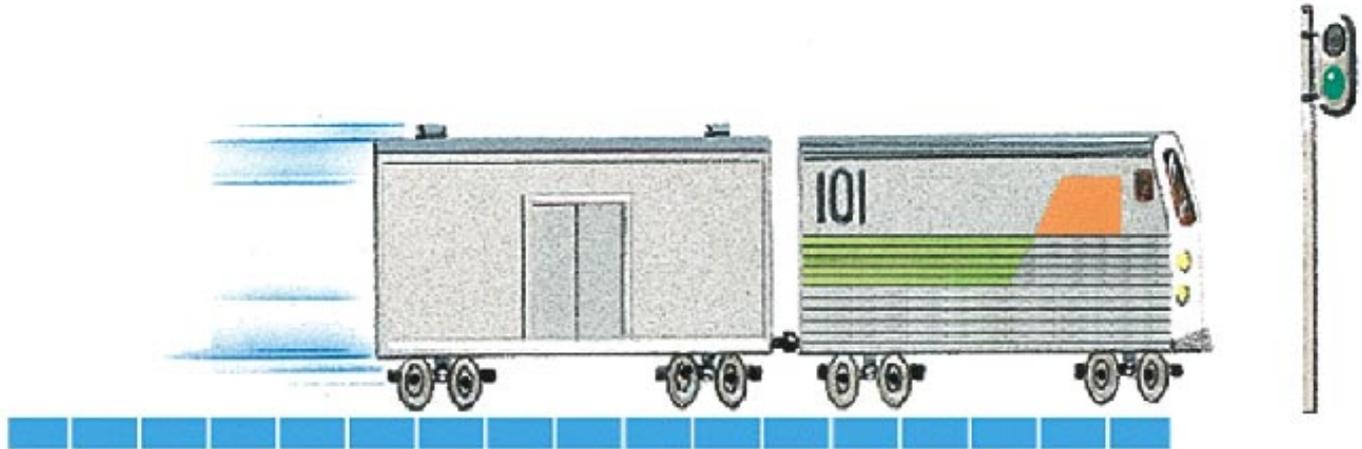


clocks run slower as one approaches the speed of light

# Special Relativity: Length Contraction

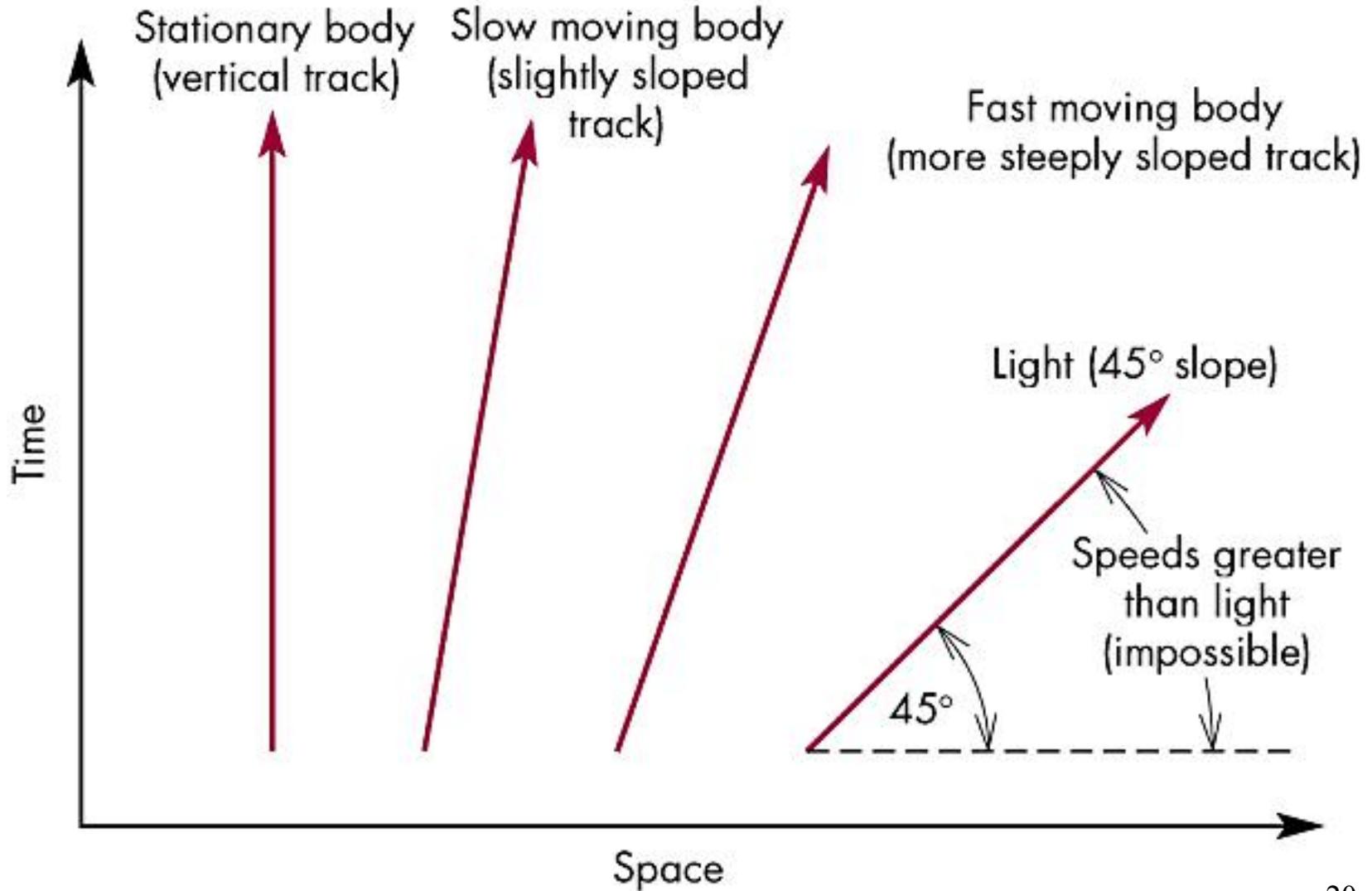


At rest

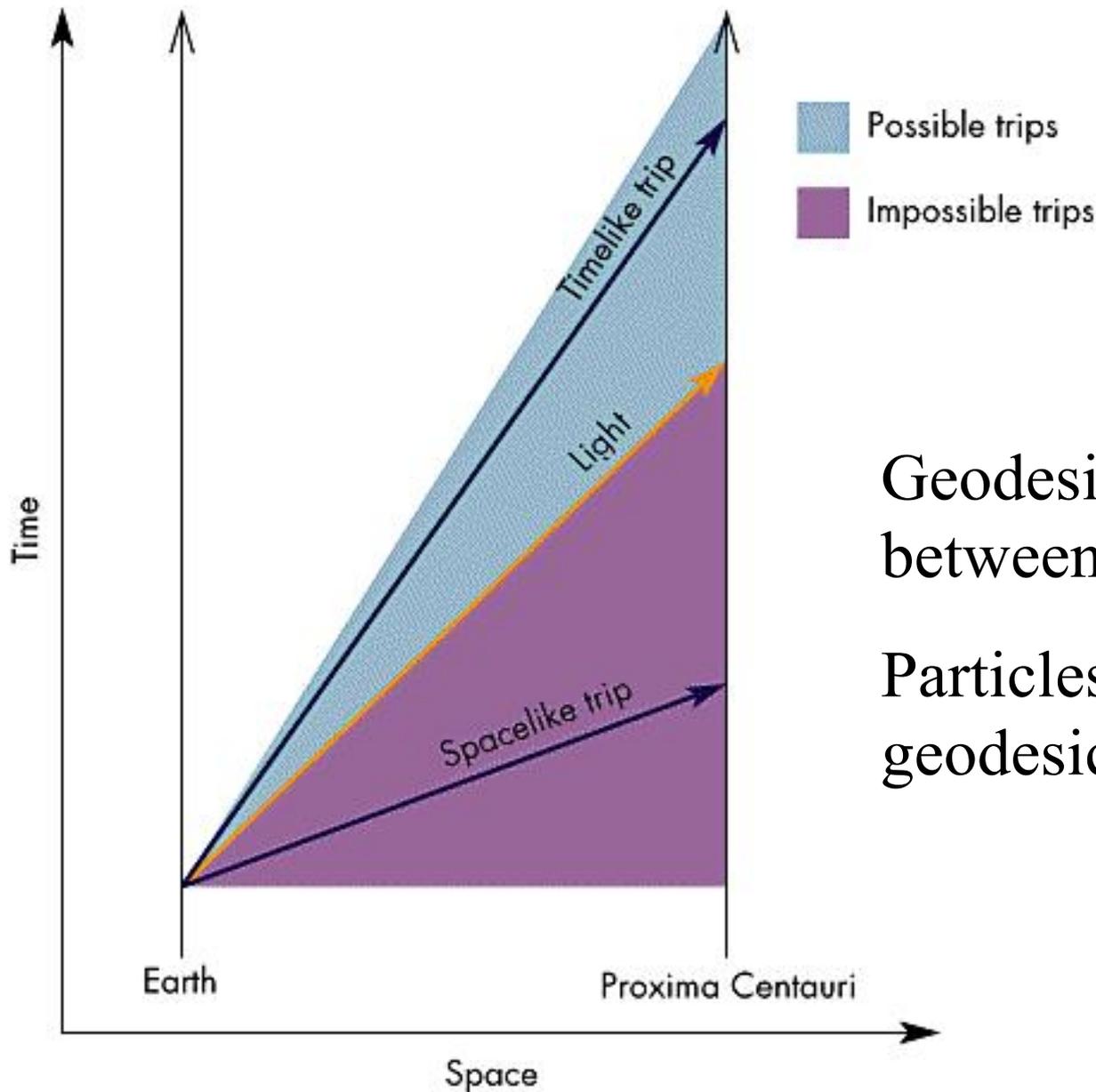


In motion

# Spacetime Diagram



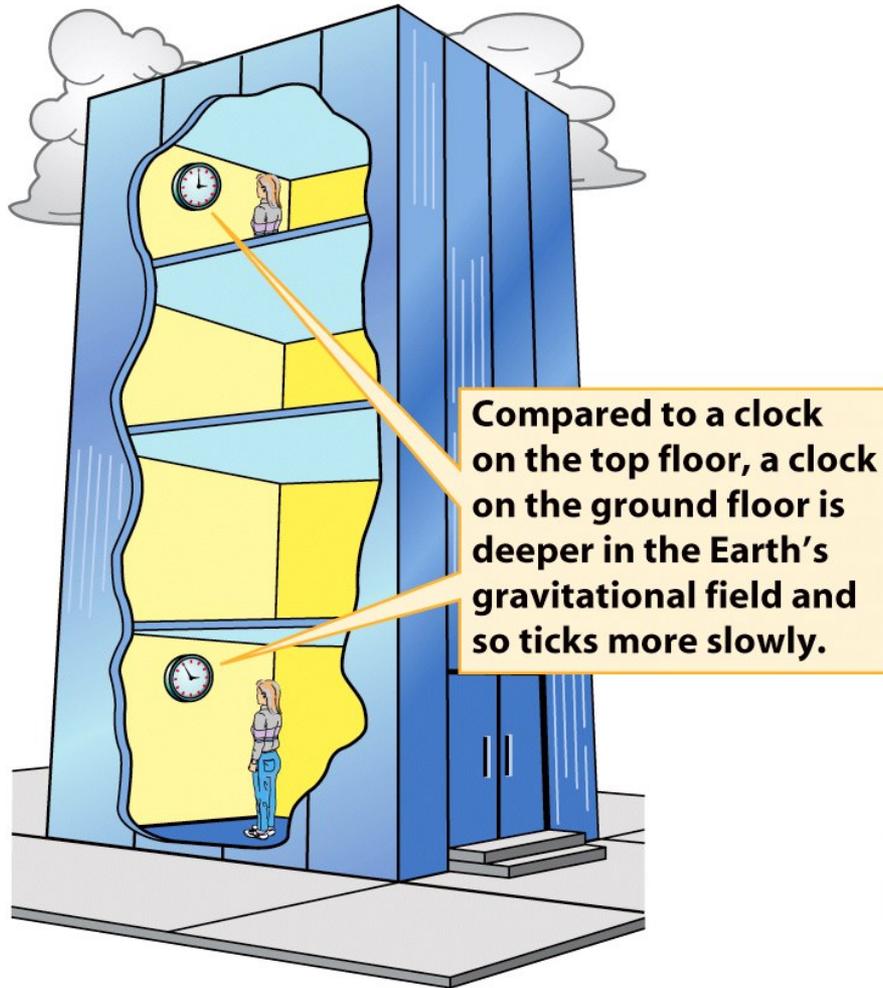
# Spacetime Diagram



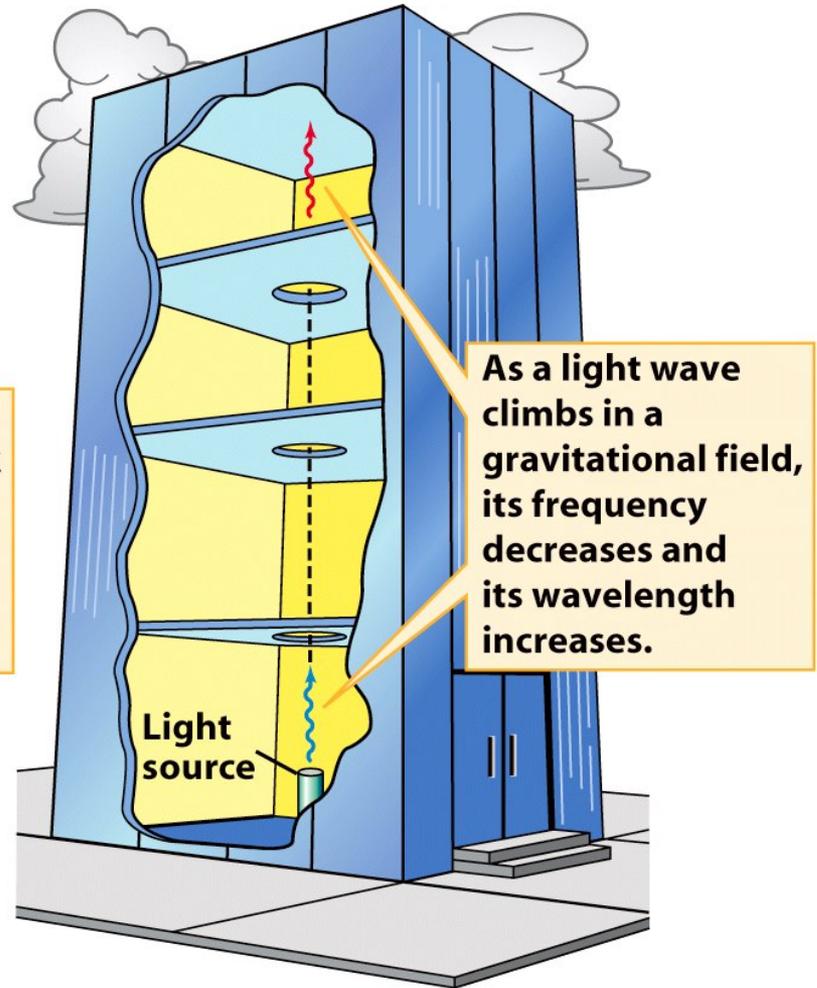
Geodesic = shortest path between two points.

Particles follow geodesics in spacetime.

# Gravitational redshift



**(a) The gravitational slowing of time**



**(b) The gravitational redshift**

# Abschnitt 1b: Der klassische „Ereignishorizont“

## **Rotverschiebung im Gravitationspotential**

Energie eines Photons:  $E = h\nu$

„Masse“ eines Photons:  $m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$

Aufstiegsarbeit:  $A = m\Delta U$

Endenergie/-frequenz:  $E' = E - A$        $\nu' = \nu \left(1 - \frac{\Delta U}{c^2}\right)$

Gravitationspotential:  $U(r) = -\frac{GM}{r}$

Rotverschiebung:  $\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{\Delta U}{c^2} = \frac{GM}{rc^2}$

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{R_S}{2r}$$

# Abschnitt 1b: Der klassische „Ereignishorizont“

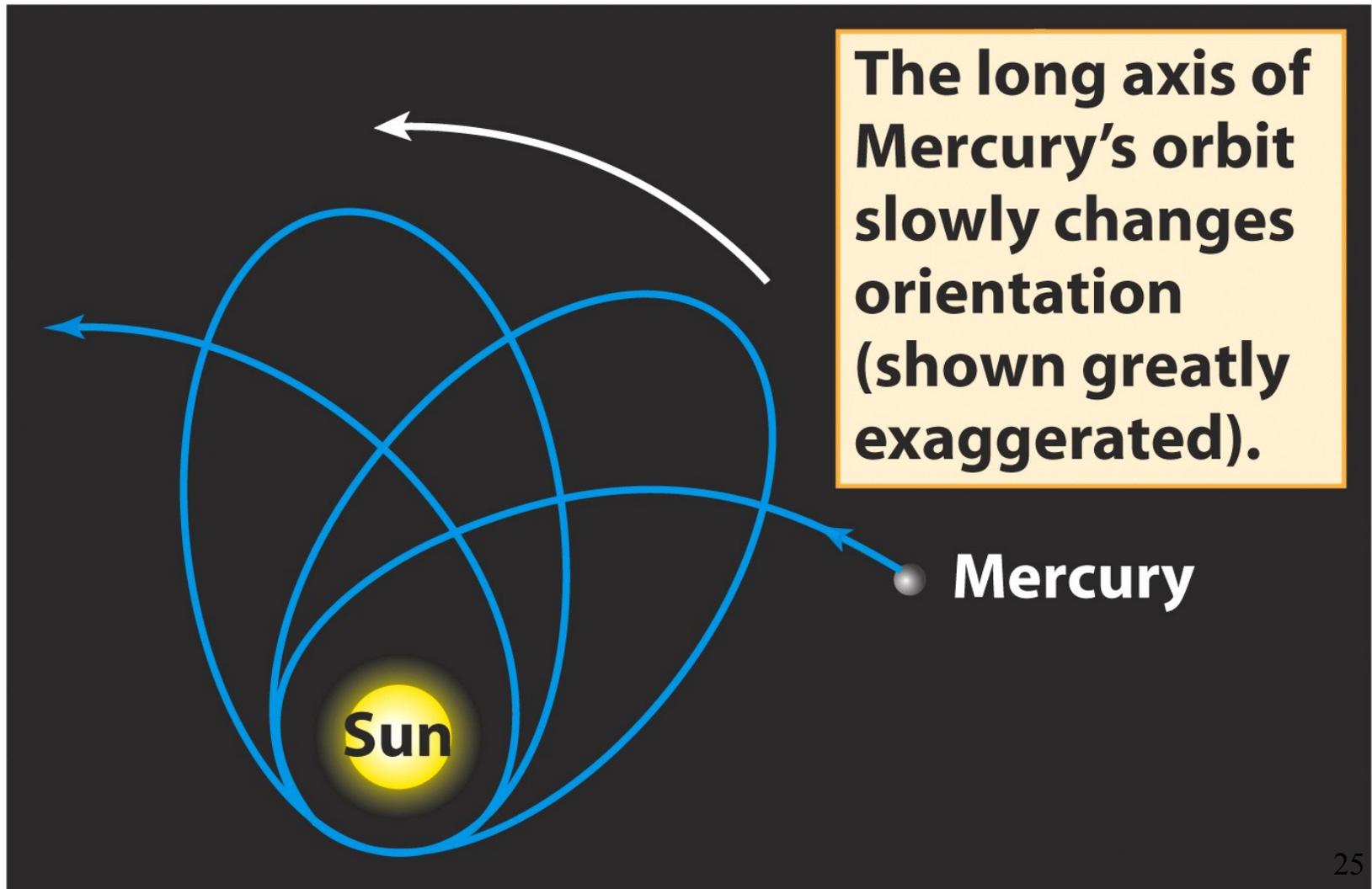
Weitere „klassische“ Relation von  $R_S$ :

Lichtablenkung bei Passage eines Lichtstrahls nahe der Oberfläche einer Masse

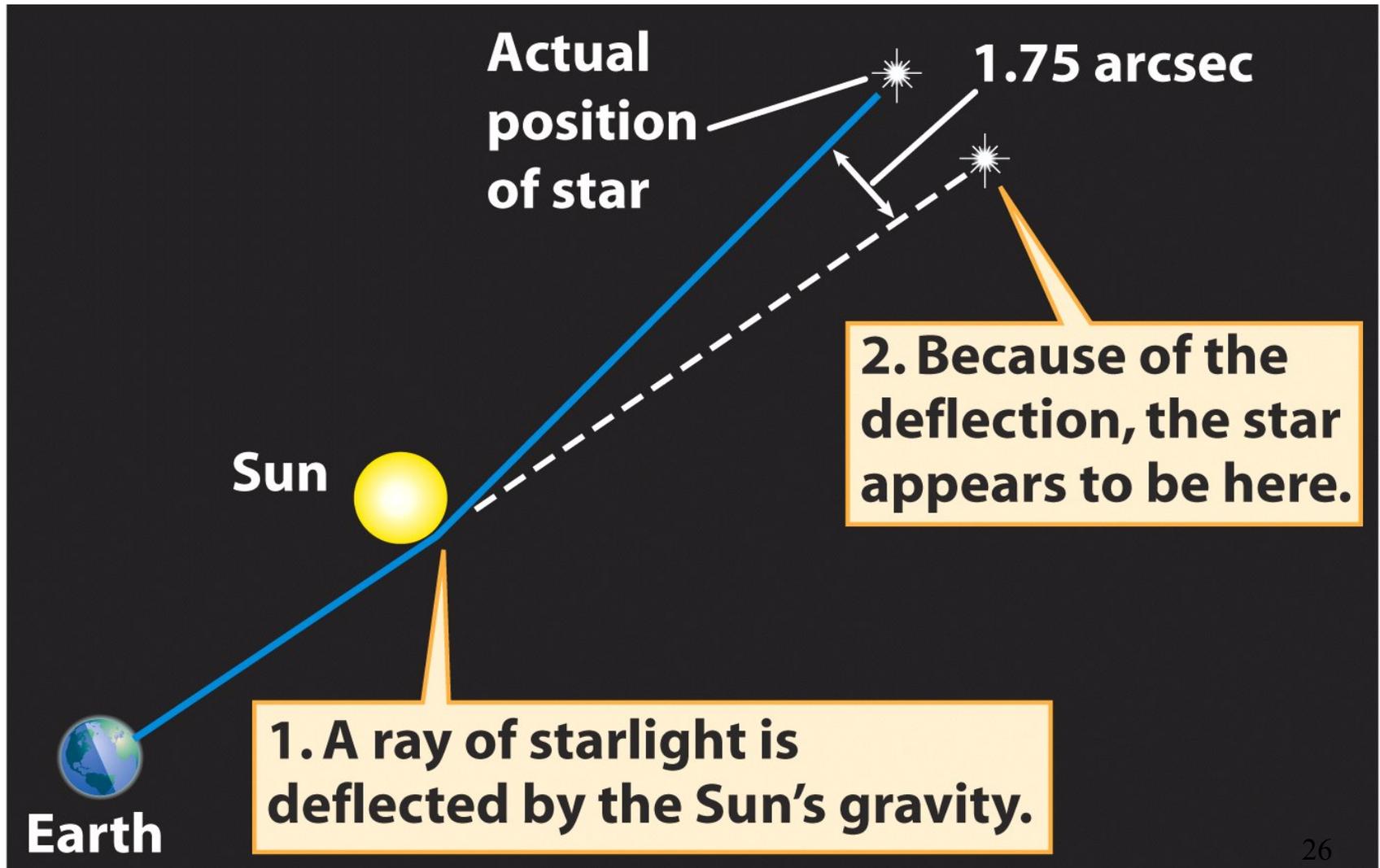
$$\delta_N = \frac{R_S}{r}$$

Die ART liefert später  $\delta_{ART} = \frac{2R_S}{r}$

# Precession of Mercury's orbit



# Gravity bends the path of light



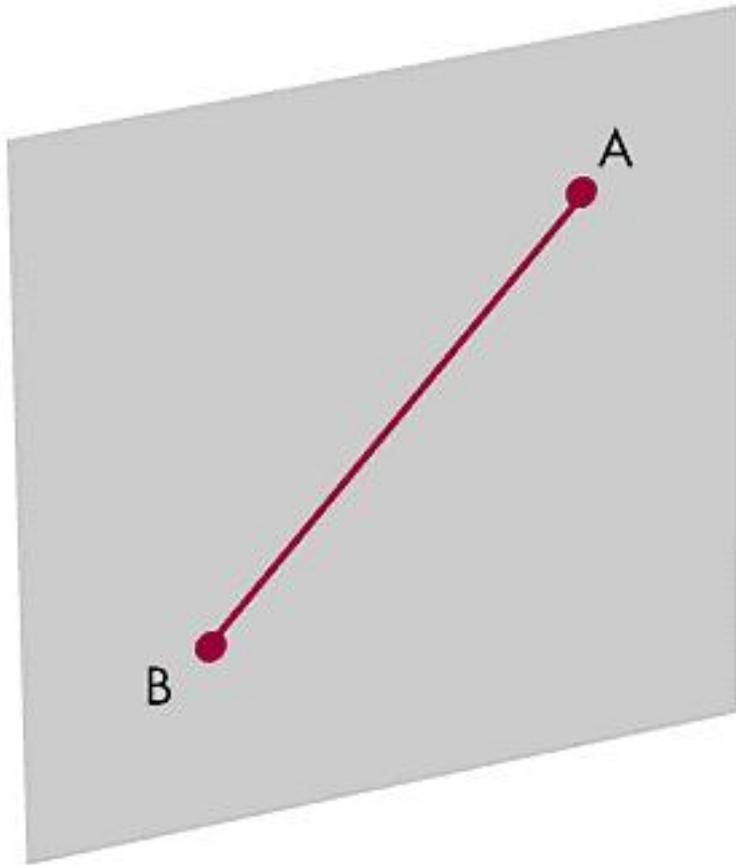
# Exkurs: Allgemeine Relativität

Gravitationskraft nach Newton:  $F_G(\mathbf{r}) = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \cdot \vec{e}_r$

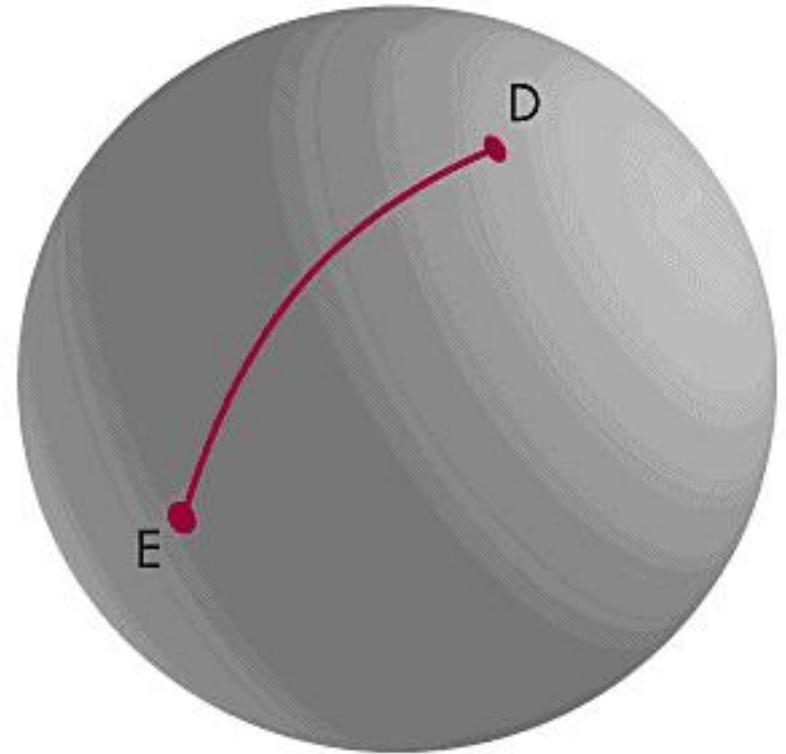
ART nach Einstein:

- Es gibt keine Gravitationskraft
- Die Masse „sagt“ der Raumzeit, wie sie sich krümmen muss.
- Die gekrümmte Raumzeit sagt der Masse wie sie sich bewegen muss
- Teilchenbahnen sind Geodäten in der gekrümmten Raumzeit  
(Geodäte: kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten -> Bewegung kräftefrei)

# Geodesics in curved spacetime



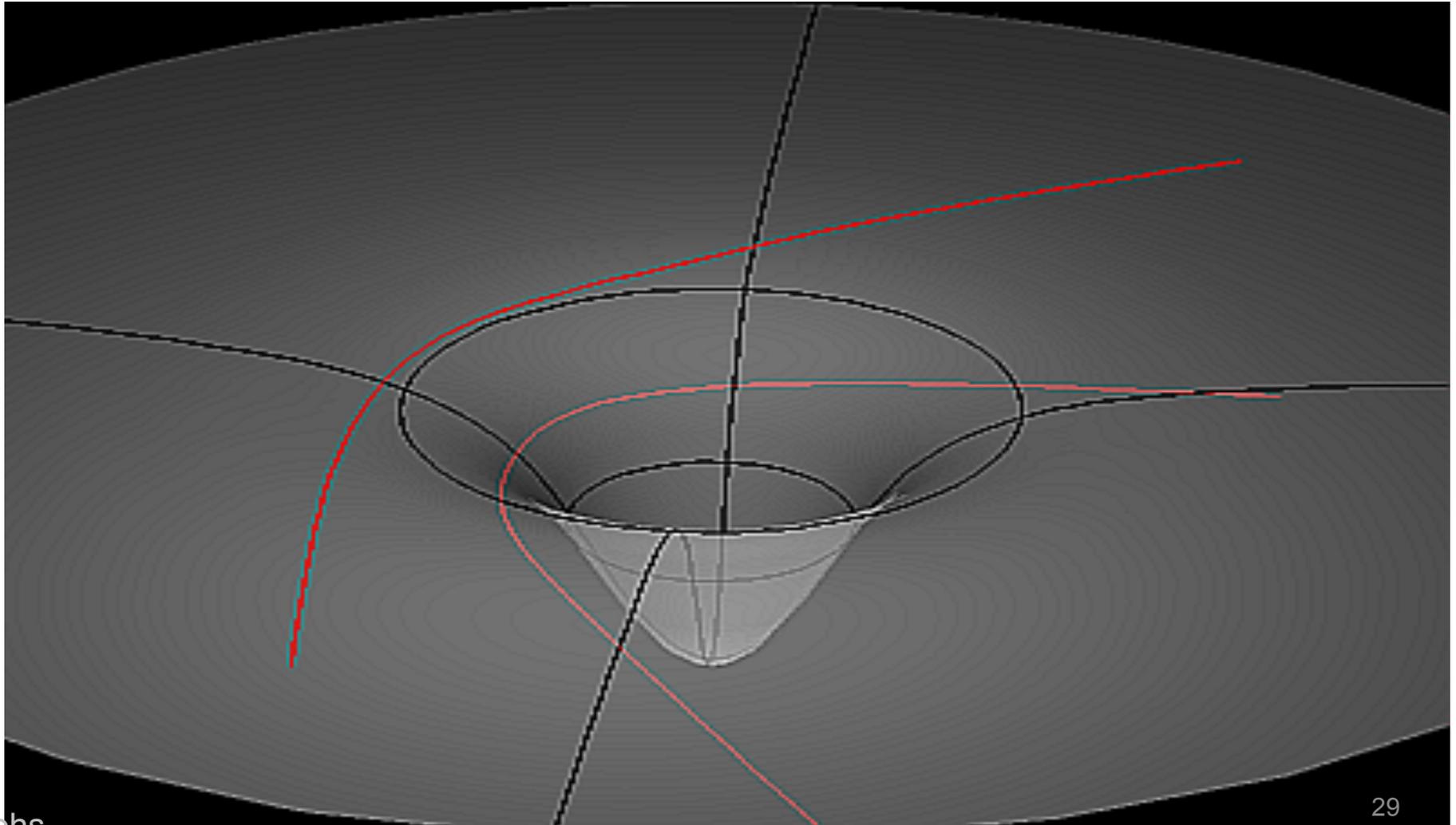
**A** Flat two-dimensional space



**B** Curved two-dimensional space

# Exkurs: Allgemeine Relativität

## Raumkrümmung und Geodäten im gekrümmten Raum



# Exkurs: Allgemeine Relativität

## Die Metrik

Die Metrik eines beliebigen Raumes gibt an, wie sich der Abstand zweier Punkte aus ihren Koordinaten ergibt.

Euklidische Metrik  
(Newtonsche Physik)  $ds^2 = (d\vec{r})^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$

In SRT wird Raummetrik zu Raumzeitmetrik

SRT-Metrik:  $ds^2 = (d\vec{r})^2 - c^2 dt^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$

# Exkurs: Allgemeine Relativität

## Die Metrik

Aus den Grundannahmen zur Raumzeit entwickelte Einstein die Feldgleichungen, die die geometrischen Eigenschaften der Raumzeit bestimmen.

Die Metriken der ART sind Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen.

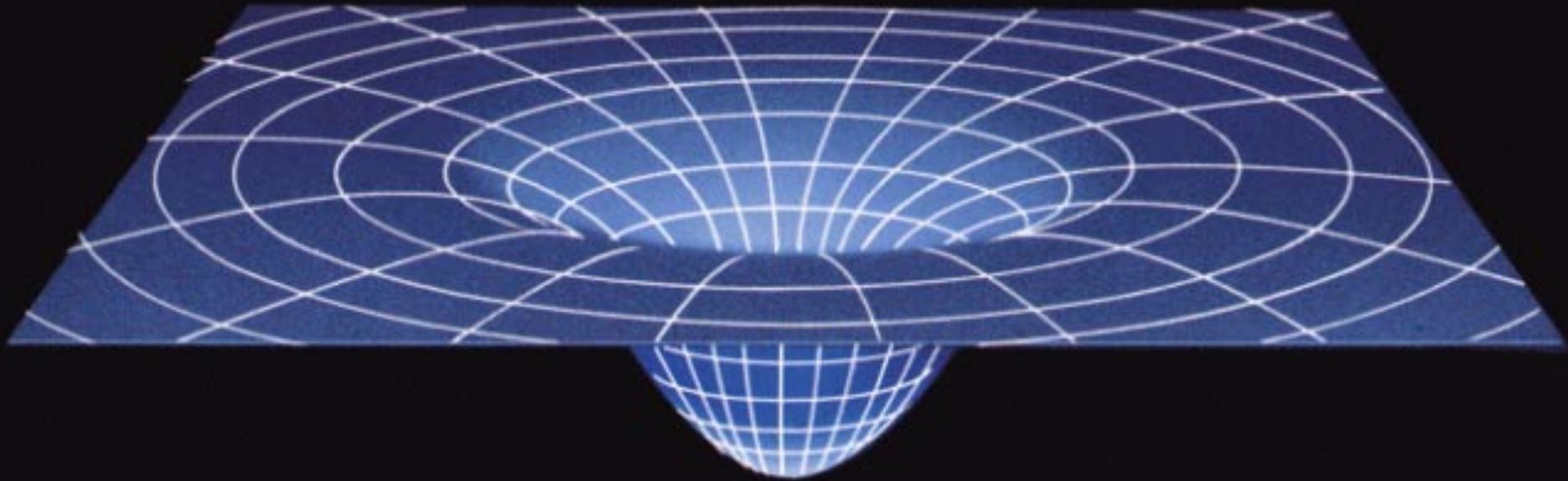
Im Folgenden wird vor allem die Schwarzschildmetrik benutzt.

Sie beschreibt die Krümmung der Raumzeit um eine sphärisch symmetrische Masse ohne Q und L, die sich im vakuumleeren Raum befindet.

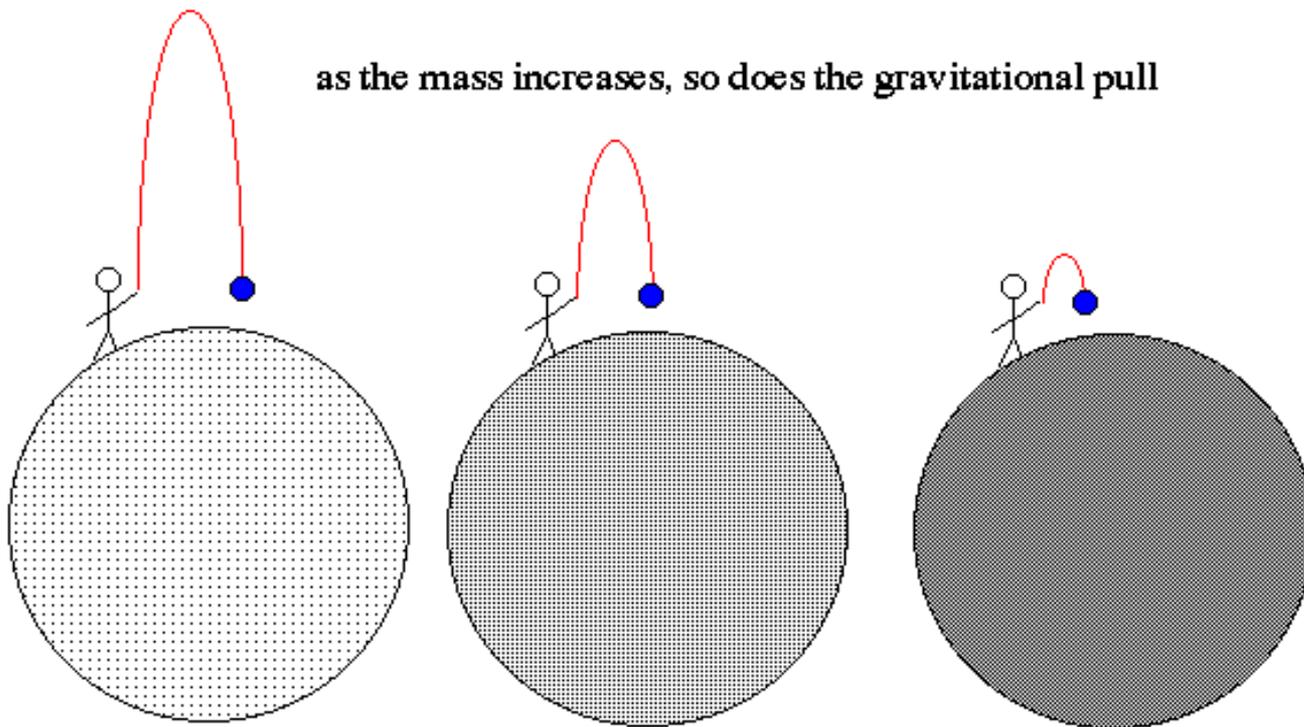
### Schwarzschildmetrik:

$$ds^2 = -c^2 \left( 1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) dt^2 + \frac{1}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2$$

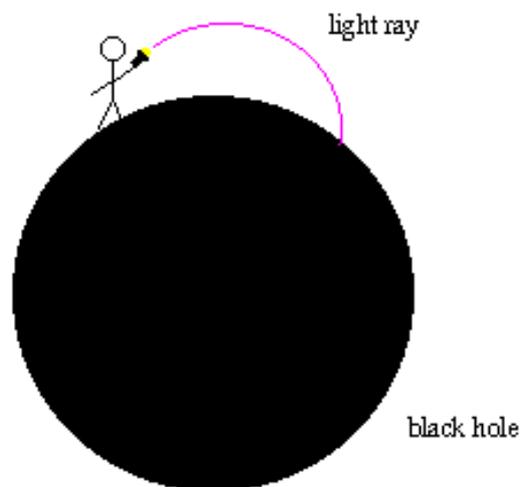
# Gravity deforms space-time



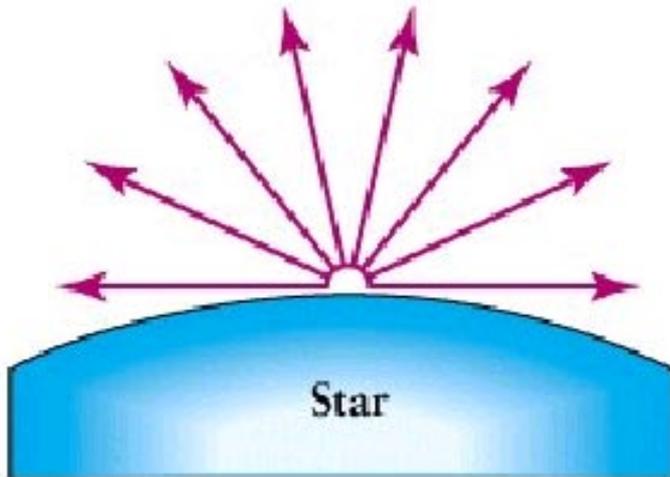
as the mass increases, so does the gravitational pull



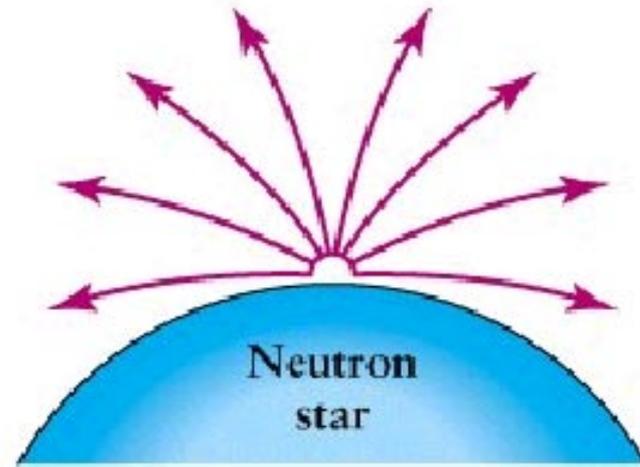
if the gravitational pull is such that even light cannot escape, then a black hole forms



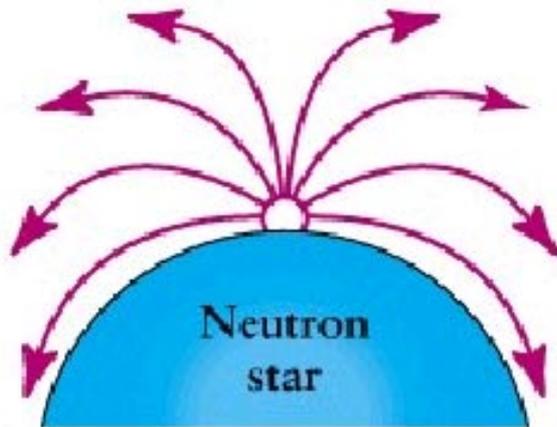
# Gravity bends the path of light



a



b

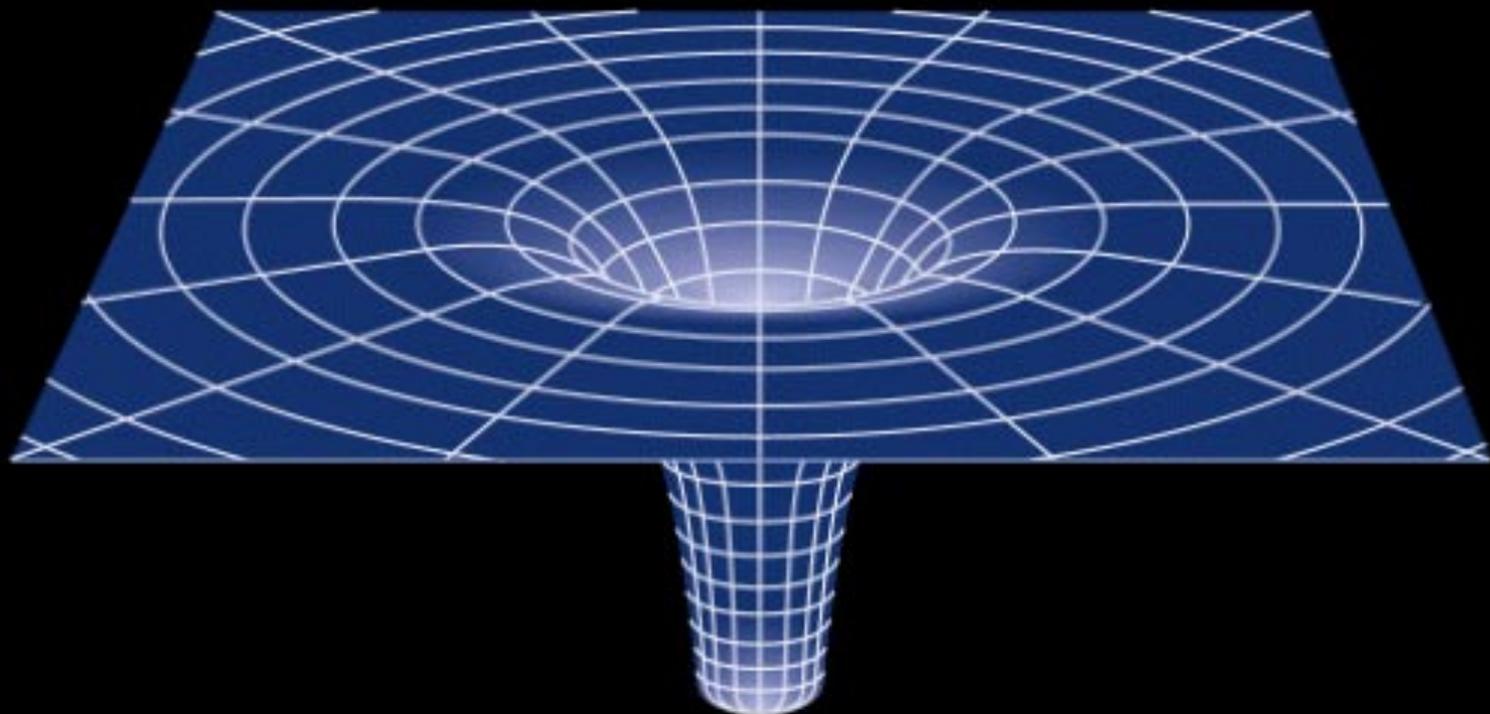


c



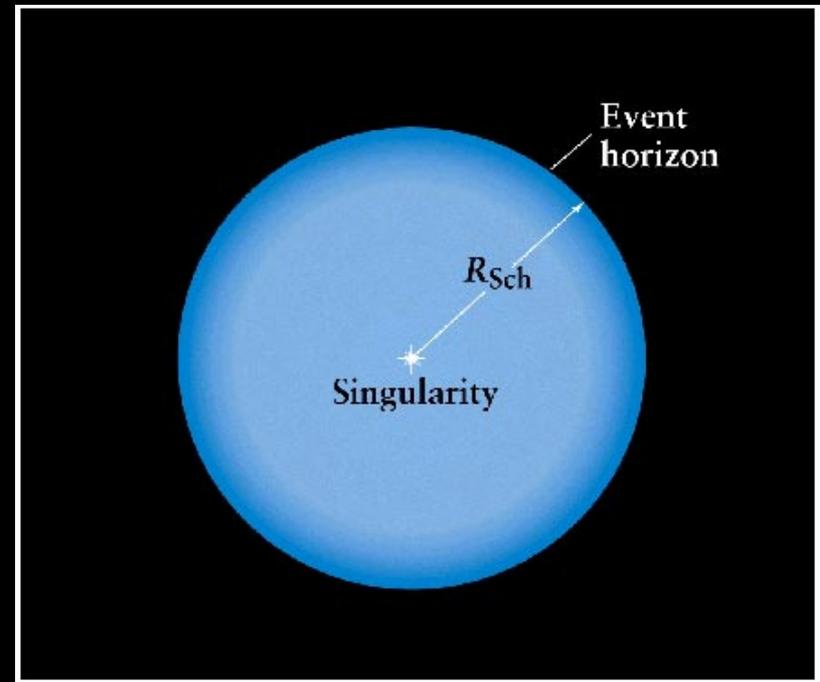
d

Spacetime should be distorted into an infinite well by a dense black hole

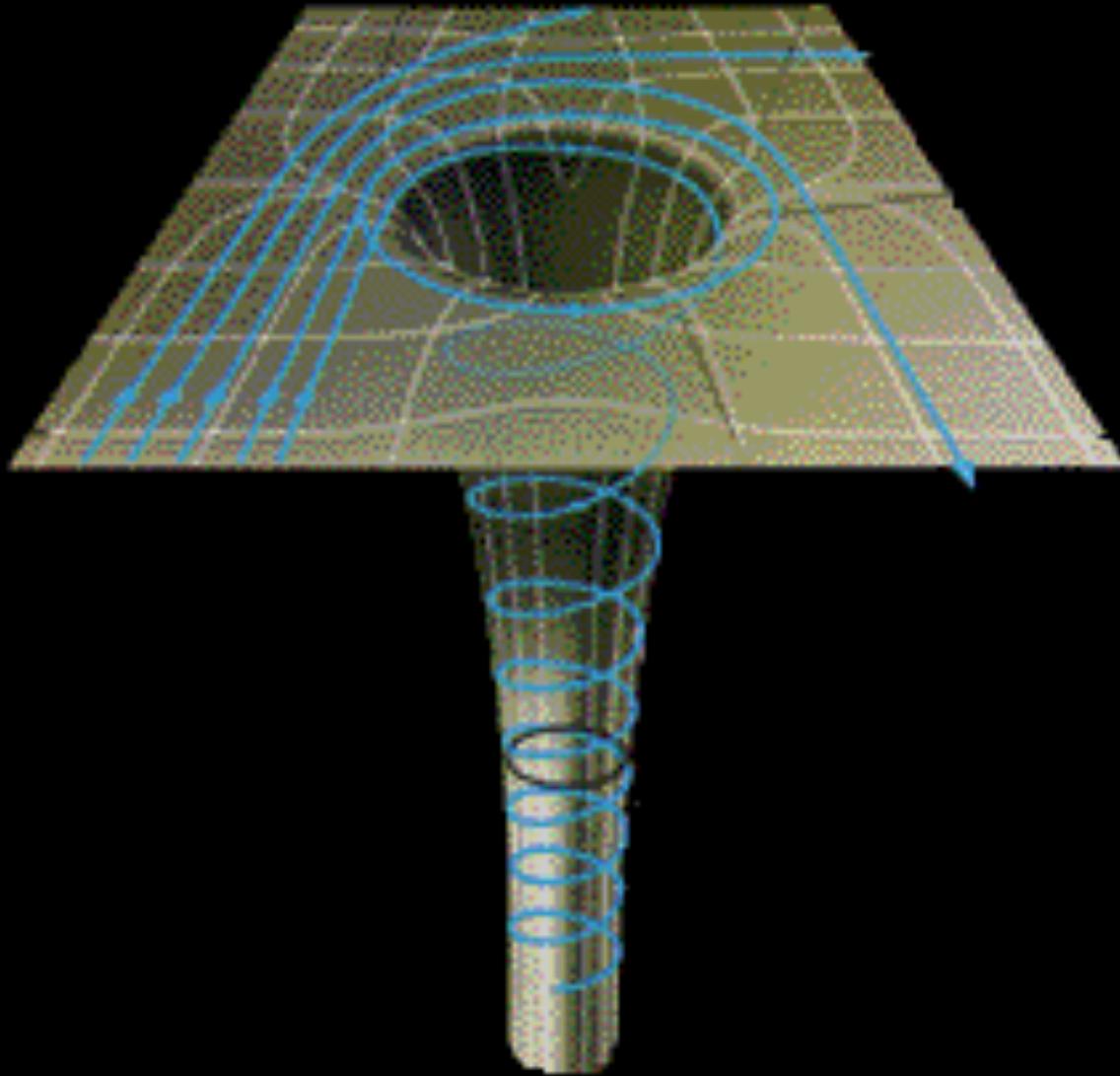


# A nonrotating black hole has only a “center” and a “surface”

- The black hole is surrounded by an *event horizon* which is the sphere from which light cannot escape
- The distance between the black hole and its event horizon is the *Schwarzschild radius* ( $R_{\text{Sch}} = 2GM/c^2$ )
- The center of the black hole is a point of infinite density and zero volume, called a *singularity*



# Event horizon



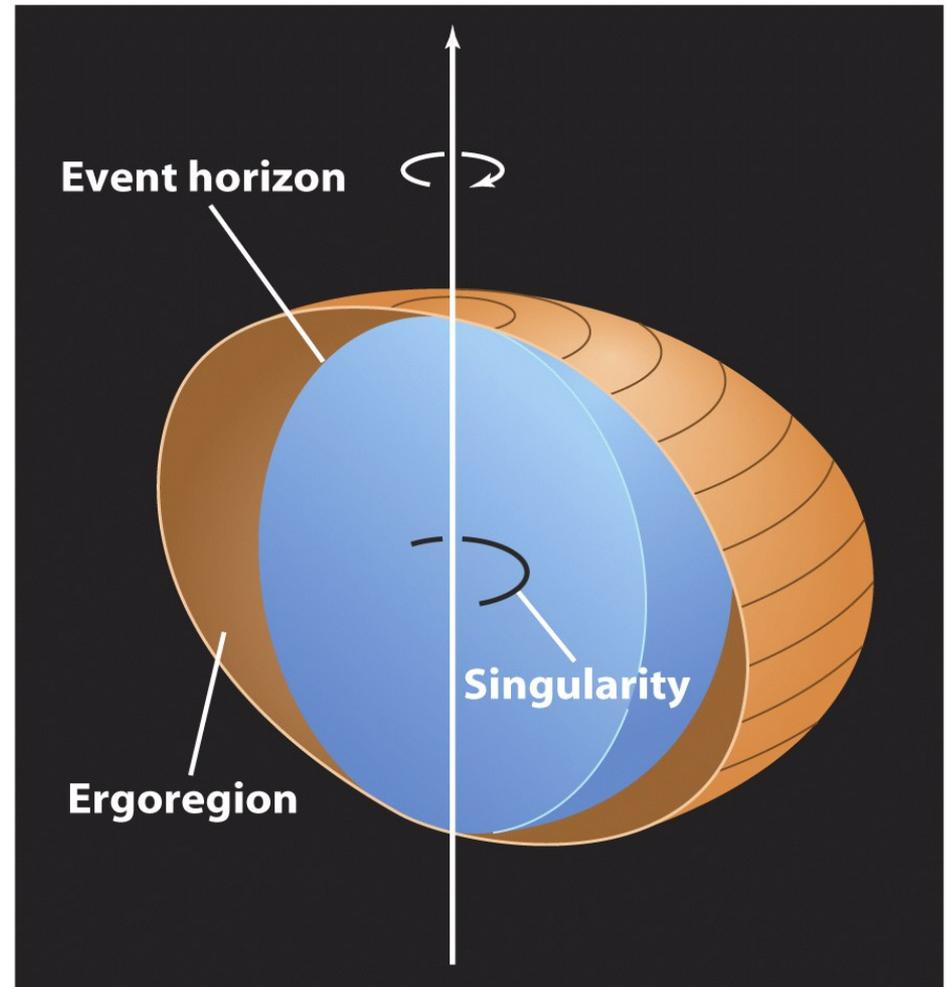
# Three parameters completely describe the structure of a black hole

- Mass
  - As measured by the black hole's effect on orbiting bodies, such as another star
- Total electric charge
  - As measured by the strength of the electric force
- Spin = angular momentum
  - How fast the black hole is spinning

*Most properties of matter vanish when matter enters a black hole, such as chemical composition, texture, color, shape, size, distinctions between protons and electrons, etc*

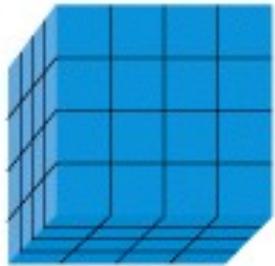
# Rotating black holes

- A rotating black hole (one with angular momentum) has an ergosphere around the outside of the event horizon
- In the ergosphere, space and time themselves are dragged along with the rotation of the black hole



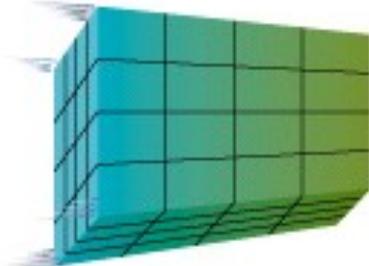
# Falling into a black hole

Probe far from  
black hole

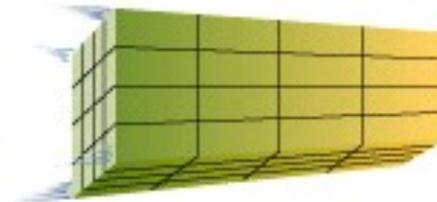


a

Probe close to black hole



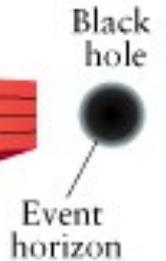
b



c



d



Falling into a black hole gravitational tidal forces pull spacetime in such a way that time becomes infinitely long (as viewed by distant observer). The falling observer sees ordinary free fall in a finite time.

# Falling into a black holes

- With a sufficiently large black hole, a freely falling observer would pass right through the event horizon in a finite time, would not feel the event horizon.
- A distant observer watching the freely falling observer would never see her fall through the event horizon (takes an infinite time).
- Falling into smaller black hole, the freely falling observer would be ripped apart by tidal effects.

# Falling into a black hole

- Signals sent from the freely falling observer would be time dilated and redshifted.
- Once inside the event horizon, no communication with the universe outside the event horizon is possible.
- But incoming signals from external world can enter.
- A black hole of mass  $M$  has exactly the same gravitational field as an ordinary mass  $M$  at large distances.

# Abschnitt 3: Sturz durch den Ereignishorizont

Oder die Antwort auf die Frage:

„Mama, ist es noch weit? Wie lang dauert es  
denn noch?“

## Abschnitt 3: Sturz durch Ereignishorizont

Teilchen startet „am Rand“ des Potentials und fällt dann radial auf das Schwarze Loch zu.

### **Der Buchhalter:**

In Buchhalter Koordinaten ergeben die Gleichungen:

$$v_{BK} = \frac{dr}{dt} = - \left( 1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) \left( \frac{2GM}{c^2 r} \right)^{\frac{1}{2}}$$

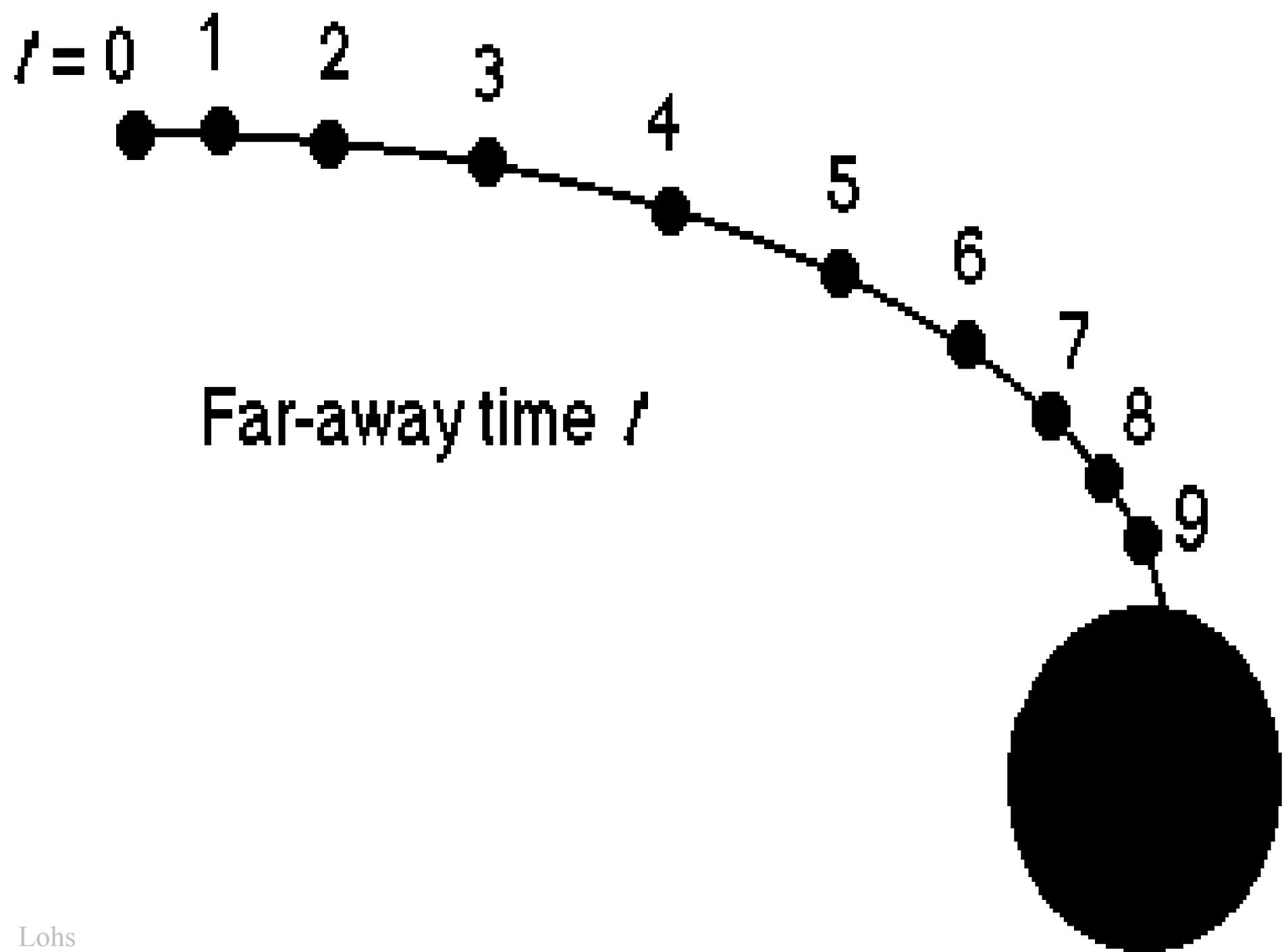
Geschwindigkeit wird erst schneller, wie intuitiv erwartet.

Ab bestimmter Nähe zu  $R_S$  wird Geschwindigkeit aber immer kleiner.

Objekt erreicht  $R_S$  nie, Zeit „friert ein“.

⇒ Russische Bezeichnung für SL ist „gefrorener Stern“.

Dennoch Objekt schwarz, weil Rotverschiebung alle Signale schnell jenseits aller Messbarkeit abschwächt.



# Abschnitt 3: Sturz durch Ereignishorizont

## **Der frei fallende Beobachter:**

Die eigene Geschwindigkeit ist für den fallenden Beobachter natürlich gleich 0.

Da keine Schale mehr ab  $R_S$  abwärts existiert, kann auch keine Relativgeschwindigkeit zu diesen gemessen werden.

Allerdings liefern die Gleichungen, dass beim Sturz aus der Unendlichkeit zwischen der Passage einer beliebigen Schale und  $R_S$  ein konkrete Eigenzeit des fallenden Beobachters vergeht.

Im Gegensatz zu den Buchhalterkoordinaten fällt der Beobachter nicht erst nach unendlicher Zeit durch den Horizont.

## Abschnitt 5: Im Schwarzen Loch

Allgemein bekannt: Aus der Region unterhalb des Horizonts gibt es keinen Rückweg, nichts kann von dort nach draußen dringen.

Frage: Warum ist das so?

Es gibt verschiedene Arten dies zu beantworten.

Möglichkeit 1 (nur für Licht):

Für ein Lichtsignal wird die Rotverschiebung ab dem Horizont so groß, dass nichts mehr beim Beobachter ankommt.

Möglichkeit 2:

Die Anziehungskräfte übersteigen den bestmöglichen Antrieb

# Abschnitt 5: Im Schwarzen Loch

Möglichkeit 3 (eleganter):

Wie aus der Schwarzschildmetrik ersichtlich ist, tauschen  $dr$  und  $dt$  innerhalb von  $R_S$  ihren Charakter.

Dies geschieht, weil der Krümmungsfaktor hier negativ wird und  $dr$  und  $dt$  so ihre Vorzeichen tauschen.

Dies bedeutet, dass der frei fallende Beobachter innerhalb  $R_S$  genauso unausweichlich zu kleineren  $r$  fällt, wie er sich vorher unausweichlich in der Zeit vorwärtsbewegt hat.

Es lässt sich sogar die Zeit berechnen, die ein free-float-frame vom Durchqueren von  $R_S$  bis zur Ankunft in der zentralen Singularität benötigt:

$$\tau_{crunch} = 6,57 \cdot 10^{-6} s \cdot \frac{M}{M_{Sun}}$$

## Abschnitt 5: Im Schwarzen Loch

Möglichkeit 4:

Man berechnet den Zukunftslichtkegel des fallenden Beobachters.

Der Zukunftslichtkegel umfasst alle Ereignisse in der Raumzeit, die in der möglichen Zukunft eines Teilchen an einem Ort der Raumzeit liegen.

Der Rand der Zukunftslichtkegel wird gebildet durch die Geodäten radial abgestrahlten Lichts.

Bei Durchquerung des Schwarzschildradius neigt sich der Zukunftslichtkegel so weit zur Singularität, dass er vollständig innerhalb des SL 's liegt. Es kann also nicht einmal mehr Licht entkommen.

A central black hole is depicted as a dark, textured sphere. It is surrounded by a bright, glowing accretion disk that exhibits a swirling, vortex-like pattern. The colors of the disk range from deep blue and purple to bright yellow and white, suggesting intense heat and light. The overall effect is one of a powerful gravitational well pulling in surrounding matter.

Schwarze Löcher: Klingt alles  
einfach, was ist so schwierig?

# Warum ist das alles so schwierig?

- “internal structures of black holes are a real great challenge” (Novikov)
- Wichtig: der Weg in den Gravitations-Abgrund des Inneren des Schwarzen Lochs ist ein Voranschreiten in der Zeit – in einem sphärischen SL ist die radiale Koordinate zeitartig – das Problem des Inneren des SL ist ein *Entwicklungsproblem* (unterscheidet sich grundsätzlich von dem Innern von Sternen oder Planeten)
- Im Prinzip: wenn wir die Bedingungen an der Grenze des SL (Ereignishorizont) kennen, dann können Einsteins Gleichungen in der Zeit integriert werden und ergeben die Struktur der immer tiefer liegenden Schichten im SL

# Weitere Schwierigkeiten

- Die Struktur der Regionen innerhalb eines SL hängt kritisch vom Schicksal des SL zu unendlich zukünftigen Zeiten eines externen Beobachters ab
- Beispiel: die innere Struktur hängt von dem finalen Zustand der SL Quantenevaporation (wg. Hawking-Strahlung), von möglichen Kollisionen von SL mit anderen SL oder anderen astronomischen Objekten und es hängt vom Schicksal des Universums selber ab
- “It is clear that theoreticians feel themselves uncomfortable under such circumstances.” (Novikov)
- All diese “Unsicherheiten” hängen mit der Struktur der Raumzeit eines realistischen SL sehr nahe an der Singularität zusammen. Diese Teile der Raumzeit befinden sich in einer Region mit einer Krümmung größer als der Planck-Wert

# Das nächste Problem

- Gesetze besagen, daß sich eine Singularität in der Struktur der Raumzeit in einem Schwarzen Loch entwickelt
- Aber ....diese Gesetze sagen nichts über den *Ort* und die *Natur* der Singularität
- Nahe der Singularität, wo die Raumzeitkrümmung sich dem Planck-Wert annähert, ist die klassische ART nicht anwendbar – es fehlt eine Quantengravitation – alles weitere ist Spekulation
- Glücklicherweise: *diese Singularitäten sind tief genug im SL und sie befinden sich in der Zukunft* verglichen mit vorhergehenden Schichten des SL wo die Krümmung nicht so groß ist und die mit einer etablierten Theorie beschrieben werden können

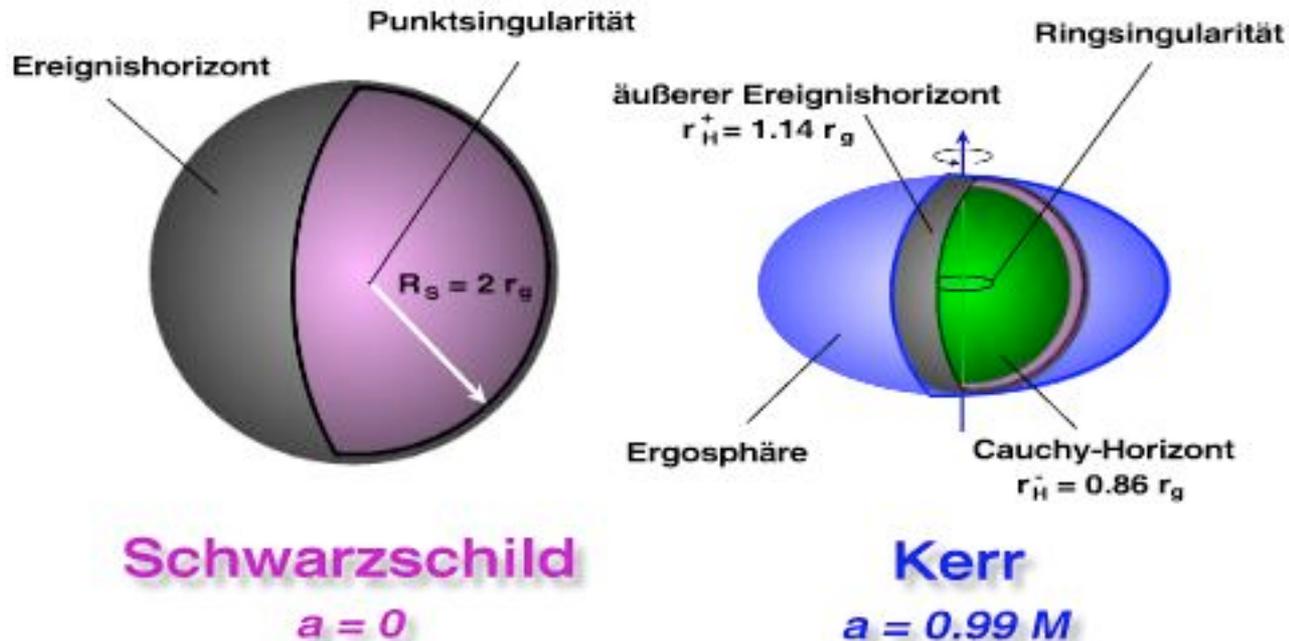
# Es gibt auch positive Punkte

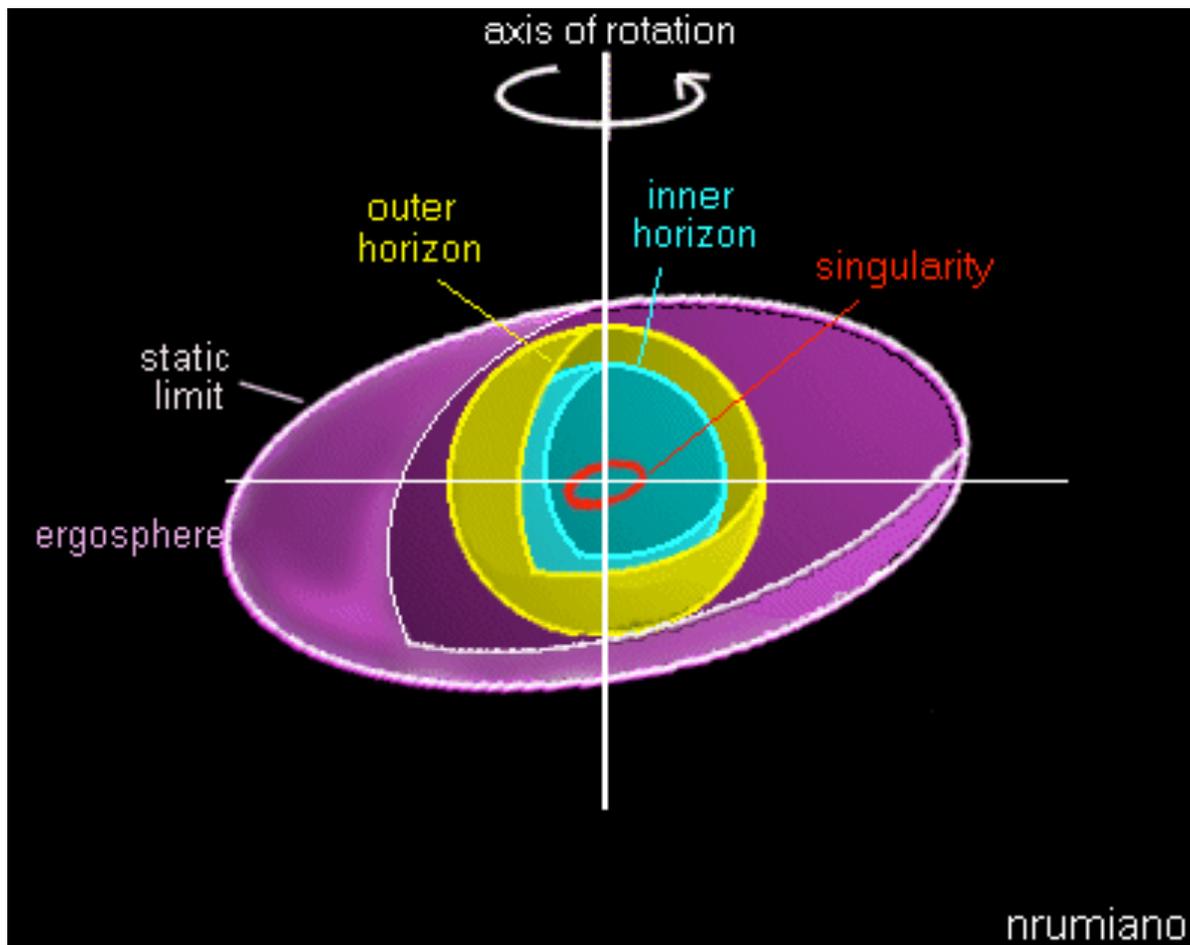
- Ohne externe Störungen in späten Zeiten (Zukunft), sind die Regionen in einem SL, die sich lang nach der SL-Bildung befinden, frei von Störungen und können durch die Schwarzschild-Geometrie für die Regionen mit Radius kleiner als der Gravitationsradius beschrieben werden.
- (gilt nicht im allgemeinen Fall, wenn Spin oder Ladung nicht verschwinden)
- Die Topologie des Inneren eines SL eines rotierenden oder geladenen SL unterscheidet sich drastisch vom Schwarzschild-Fall
- Grund: das Innere besitzt in diesem Fall einen *Cauchy Horizont*

# Es gibt auch positive Punkte

**Cauchy-Horizont:** neben dem Ereignishorizont können spezielle SL – wie die Kerr-Metrik – einen weiteren, inneren Horizont aufweisen. Dieser Cauchy-Horizont kann nur genau einmal gekreuzt werden.

Es handelt sich um eine Oberfläche von unendlicher Blauverschiebung – diese unendlich blauverschobene Strahlung zusammen mit der gestreuten Strahlung auf der gekrümmten Raumzeit innerhalb eines SL führt zur Entstehung einer gekrümmten Singularität – **Cauchy Horizont Singularität**





- Dies bedarf sicher einiger Erklärungen: Eine Raumzeit ist eine vierdimensionale Mannigfaltigkeit, die eine Lösung der Einsteinschen [Feldgleichungen](#) der [Allgemeinen Relativitätstheorie](#) (ART) ist. Eine Hyperfläche zu diesem 4D-Gebilde ist deshalb dreidimensional. Im [ADM-Formalismus](#) wird die Raumzeit beispielsweise in Hyperflächen zerlegt, um numerische Relativitätstheorie betreiben zu können (3+1 Split). Mit der oben genannten **kausalen Kurve** meint man eine Weltlinie, also eine Kurve in der Raumzeit, die beispielsweise ein Beobachter oder ein Materieteilchen zurücklegt. Kausale Kurven sind aber nicht in die Vergangenheit fortzusetzen! Die Bedingung des 'Einmalschneidens' bedeutet also anschaulich, dass Cauchy-Flächen *nur in einer Richtung durchlässig* sind.
- Mehr Horizonte beim Loch
- Der Bezug zu Schwarzen Löchern ist der Folgende: Betrachtet man die [Kerr-Lösung](#), die die rotierende Raumzeit Schwarzer Löcher beschreibt, so findet man beim Nullsetzen des Delta-Potentials in [Boyer-Lindquist-Koordinaten](#) im Allgemeinen zwei Lösungen dieser quadratischen Gleichung: Die eine bezeichnet man mit  $r_+$  und kann gerade mit dem [Ereignishorizont](#), dem **äußeren Horizont** Schwarzer Löcher, identifiziert werden. Die andere Lösung,  $r_-$ , ist der **innere Horizont** und besagte Cauchy-Fläche.
- **Seltene Effekte am Cauchy-Horizont**
- Gelangt nun ein Beobachter auf einer [Geodäte](#) hinter den Cauchy-Horizont, so wird er Zeuge, wie die gesamte Geschichte der Außenwelt in Zeitraffer abläuft. Denn er erreicht eine **Region unendlicher [Blauverschiebung](#)**. Dummerweise wird er dann auch von einem energetisch betrachtet unendlichen Strahlungsblitz getroffen. Eine seltsame Eigenschaft von Cauchy-Horizonten ist, dass sie singular werden, wenn sie durch Objekte, die sie passieren, gestört werden. Cauchy-Horizonte sind **singuläre Nullhyperflächen**. Diese seltsamen Eigenschaften deuten darauf hin, dass hier die Domäne einer [Quantengravitation](#) beginnt.

A. Müller / Lexikon der Astrophysik

- Bei einem rotierenden SL: das Anwachsen der Krümmung und Massen-Funktion, wenn man zu der Singularität kommt, wird moduliert durch die unendliche Zahl der Oszillationen. Dieses oszillierende Verhalten der Singularität hängt mit dem “dragging” des Inertialsystems durch die Rotation des SL zusammen (Formel)
- Die Singularität am Cauchy Horizont ist ziemlich schwach – ein einfallendes Objekt wird endliche, vernachlässigbare Gezeitendeformationen erleben. Diese Singularität existiert in einem SL zu späten Zeiten from Point of View eines externen Beobachters – es handelt sich um eine schwache Singularität
- Die Singularität, die kurz nach einem Gravitations-Kollaps eines Sterns entsteht, ist wesentlich stärker – starke Singularität – Belinsky-Khalatnikov-Lifshitz (BKL) raumartige Singularität
- Ein Beobachter, der in ein isoliertes SL fällt, erreicht in späten Zeiten meist eine schwache Singularität

- “This picture was considered in details in the case of a charged spherical black hole but I do not know the strict proof of it in the case of a rotating black hole.” (Novikov)
- Nochmal – es ist wichtig: die boundary conditions bis in die Unendlichkeit müssen bekannt sein da die essentiellen Ereignisse – Mass Inflation und Bildung der Singularität – entlang des Cauchy Horionts passieren und Informationen aus der unendlichen Zukunft der externen Raumzeit enthalten.
- Nicht mal ein isoliertes SL in einer asymptotisch flachen Raumzeit kann für immer existieren: es wird evaporieren durch die Emission von Hawking-Strahlung – dies ist wichtig für das gesamte Problem. Um dies zu berücksichtigen müssen die boundary conditions am Ereignishorizont geändert werden. Sie müssen nun einen Fluß von negativer Energie durch den Horizont beinhalten.
- Der letzte Zustand der Quantenevaporation – wenn die Masse des SL vergleichbar der Planck Masse wird ist unbekannt. Aus der Sicht der semiklassischen Physik entsteht hier die Singularität.
- “Probably at this stage the black hole has the characteristics of an extreme black hole, when the external event horizon and internal Cauchy horizon coincide.” (Novikov)

- Bislang: isolierte SL betrachtet, die sich gebildet haben als Resultat eines realistischen Gravitationskollaps, ohne Annahme über die Symmetrie
- Aber: bei realistischen SL fällt ständig Materie und Strahlung durch den Ereignishorizont bis in die Unendlichkeit (oder bis zur Evaporation)
- Was zu berücksichtigen ist:
  - Kollaps durch nicht-symmetrischen Körper
  - Einfang von Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung
  - Unterschiede in der Krümmung der Raumzeit verglichen mit dem idealen Modell
  - Etc.
- Irgendwelche Details der klassischen Raumzeit Struktur wissen zu wollen, in der singulären Quantenregion, macht noch keinen Sinn. Das bedeutet, man kann und muß die Zeit berücksichtigen  $t_0$ . Alle Strahlung, die später durch die Grenze fällt, wird in der Singularität landen und nicht die Struktur der Raumzeit außerhalb dieses Raumes beeinflussen.

$$t_0 = 3 \times 10^6 \text{ sec } (M/10^9 M_{\text{sonne}})$$

- Kann ein außenstehender Beobachter Informationen aus dem Innern eines SL erhalten?
- In einem statischen Fall?
- “Certainly it is possible if one is allowed to violate the weak energy condition.” (Novikov)
- Negative Materie in ein SL geben – die Oberfläche wird kleiner und einiger der Strahlen, die vorher gefangen waren, müßten in der Lage sein, das SL zu verlassen. Eine kleine schmale Region, die direkt innerhalb des Horizonts des vorherigen SL liegt müßte sichtbar werden.
- Um größere Regionen zu sehen, oder tief hineinzuschauen, müßte man die Parameter drastisch ändern, oder es zerstören. Mit gleicher Menge negativer Materie könnte ein Beobachter die Region nahe der Singularität sehen.
- Ohne zu zerstören: “traversable wormhole and its mouths are free falling into a black hole. If one of the mouths crosses the gravitational radius earlier than the other, then rays passing through the first mouth can escape from the region lying inside the gravitational radius. Such rays would go through the wormhole and enter the outside region through the second mouth.”

# Simulation: auf dem Weg ins Schwarze Loch

- <http://www.newscientist.com/article/dn16885-what-would-it-look-like-to-fall-into-a-black-hole.html>

A black hole is depicted at the center, surrounded by a glowing accretion disk. The disk is composed of concentric rings of light, with colors ranging from bright yellow and orange near the center to deep blue and purple towards the outer edges. The overall effect is a swirling, tunnel-like structure.

Schwarze Löcher:  
Hawkingstrahlung

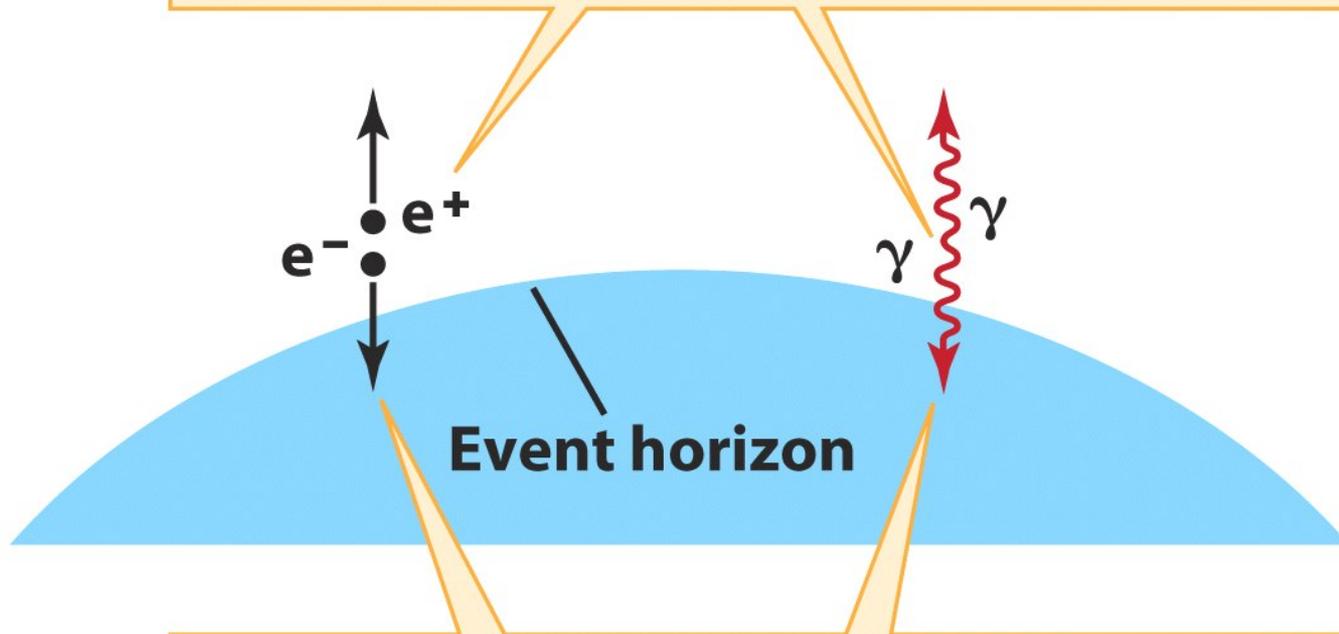
# Hawking-Strahlung

- 1975, Hawking und Bekenstein: finden Verbindung zwischen Thermodynamik, Quantenmechanik und Schwarzen Löchern – SL zerstrahlen

# Black holes evaporate

1. Pairs of virtual particles spontaneously appear and annihilate everywhere in the universe.

2. If a pair appears just outside a black hole's event horizon, tidal forces can pull the pair apart, preventing them from annihilating each other.



3. If one member of the pair crosses the event horizon, the other can escape into space, carrying energy away from the black hole.

# Hawking-Strahlung

- Materialisiert sich ein Paar nahe des Ereignishorizonts eines SL, kann ein Teilchen in das SL fallen, während das andere ins Unendliche entweicht – aus dem virtuellen Teilchen wird ein reales, ein messbares Teilchen. Stammt die Energie für das virtuelle Teilchenpaar vom SL, so bietet der Hawking-Effekt eine Möglichkeit, dem SL Energie zu entziehen
- Lebensdauer eines stellaren SL:  $10^{66}$  Jahre (Alter des Universums  $10^{10}$  Jahre)
- Nur für massearme SL interessant:  $10^{14}$  Gramm – würde in  $10^{-23}$  Sekunden seine ganze Ruhemasse abstrahlen – ähnelt einer Explosion, die  $10^{35}$  erg Energie freisetzt – sollte beobachtbar sein

# Entropie eines Schwarzen Lochs

$$S_{\text{SL}} = \frac{Ak_Bc^3}{4\hbar G} \quad T = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B GM}$$

Wobei  $\hbar$  das Plancksche Wirkungsquantum bzw. hier diracsche Konstante,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $\pi$  die Kreiszahl Pi,  $k_B$  die Boltzmannkonstante,  $G$  die Gravitationskonstante und  $M$  die Masse ist.

Schwarze Löcher besitzen eine Entropie und eine Temperatur. Die Entropie  $S$  eines SL ist proportional zur Oberfläche  $A$  seines Horizonts und sonst nur von Naturkonstanten abhängig.

# Lebensdauer eines Schwarzen Lochs

$$\Delta t = \frac{M^3}{3\Lambda_t}$$

wobei  $M$  die Masse des Schwarzen Loches zu Beginn der Zeitspanne und  $\Lambda_t$  eine Konstante mit

$$\Lambda_t = 3,968 \cdot 10^{15} \frac{\text{kg}^3}{\text{s}}$$

# Hawking-Radiation & Information loss problem

- S. Hawking und K. Thorne: philosophisches Problem – basierend auf Entdeckung von 1975 (Hawking, Bekenstein)

## Hawkingstrahlung

- SL fangen Teilchen aus der Umgebung und verschlucken sie auf Nimmerwiedersehen.
  - Damit gehen Informationen (z.Bsp. über Quantenzustände wie den Spin) verloren.
  - Was ist Information? Ist unser Universum ein gigantischer Quantencomputer? Ist Information der Energie vergleichbar? Kann nicht vernichtet werden, sondern sollte allenfalls in andere Formen umwandelbar sein (Erhaltung in Quantenmechanik gefordert). Naturgesetz?
- Einige Theoretiker vermuten, daß zumindest gewisse Informationen mit der Hawking-Strahlung wieder nach außen dringen können
  - Oder, daß sie spätestens mit dem Strahlenblitz bei ihrem Ableben die gesammelte Information wieder abgeben.
  - Nichts Genaues weiß man nicht, so lange man das wahre Wesen der SL nicht kennt

# Hawking-Strahlung

- Diese Strahlungsform ist kein reiner ART-Effekt, sondern kann nur unter Berücksichtigung der Quantentheorie erklärt werden
- Experimenteller Nachweis bislang nicht möglich
- Wichtig: Begriffe wie Temperatur und Entropie für Schwarze Löcher definierbar
- **Entropie** eines SL ist proportional der Horizontoberfläche (Bekenstein-Hwking-Entropie): Die Oberfläche des Ereignishorizonts Schwarzer Löcher kann nicht mit der Zeit abnehmen. -> kosmische, stellare SL haben gigantische Entropien während Schwarze Mini-Löcher moderate Entropien haben
- **Temperatur**: hängt mit der Oberflächengravitation zusammen, steigt umgekehrt proportional zur Lochmasse an – Minilöcher sind heißer als supermassereiche S L

# Hawking-Strahlung

- Hawking ging über die Konzepte der klassischen Theorie Schwarzer Löcher hinaus und machte einen semiklassischen Ansatz, indem er Quantenfelder auf dem Hintergrund gekrümmter Metriken untersuchte
- Die Felder, die mit Teilchen wie Elektronen, Photonen oder Neutrinos assoziiert sein können, sind quantisiert, nicht jedoch die Gravitationsfelder – diese werden nach wie vor mit der ART beschrieben – semiklassische Quantengravitation
- Während in der klassischen Theorie SL reien Absorber von Teilchen und Strahlung sind, eröffnet der quantenfeldtheoretische Zugang die Möglichkeit, daß SL auch in einer konstanten Rate Teilchen emittieren – Hawking Strahlung.
- “Strahlung” bedeutet nicht zwingend reine elektromagnetische Emission – sondern alle möglichen Teilchen

# Quantenvakuum

- Der gesamte Raum – auch das Vakuum – ist gefüllt mit Paaren virtueller Teilchen und deren Antiteilchen
- Energie so gering, daß die Teilchen im Rahmen der Heisenberg'schen Unschärferelation (Ort-Impuls-Unschärfe, Energie-Zeit-Unschärfe) eine sehr kurze Lebensdauer haben und daher nicht zu messen sind: virtuell
- Permanente Annihilation und Neubildung – indirekt ist dieser Effekt bei der so genannten **Lamb-Shift**, einer Verschiebung der Spektrallinien im Wasserstoffspektrum messbar

A black hole is depicted at the center, surrounded by a glowing accretion disk. The disk is composed of swirling blue and purple gas, with bright yellow and orange spots representing intense heat and radiation. The overall scene is set against a dark, starry background.

Schwarze Löcher:  
Information loss problem

# Entropieparadox = Informationsverlustparadox

- Supermassive SL sprengen fast die Entropieskala
- Größenordnung von  $10^{77} k_B$  für ein stellares SL pass nicht zu dr wesentlich kleineren Entropie des Vorläufersterns:  
**Entropieparadox**
- Entropie= Maß für die Unordnung
- Andere Interpretation als “Information” führt auf die alternative Bezeichnung desselben Sachverhalts als  
**Informationsverlustparadox**
- Unklar: was im Gravitationskollaps von Sternen zu SL mit der Entropie bzw. der Information geschieht. Ein Stern ist ein komplexes Gebilde mit und muß durch viele Parameter beschrieben werden, ein SL ist ein recht “einfach gestricktes” Objekt

# Informationsverlustparadox

- Wie verliert ein Stern im Kollaps seinen hohen Informationsgehalt?
  - Entweder vernichten SL Informationen
  - Oder
  - Die Information bleibt in irgendeiner Form tief im Innern des SL erhalten



## GR17 - Public Lectures

We are delighted to announce that Prof. Sir Roger Penrose and Prof. Kip Thorne have agreed to deliver public lectures during the week of the conference:

Monday 19th July 8.00pm RDS Concert Hall

**Prof. Kip Thorne - "Probing the Universe and Black Holes with Gravitational Waves"**

Friday 23rd July 8.00pm RDS Concert Hall

**Prof. Sir Roger Penrose - "Fashion, Faith, and Fantasy in Modern Physical Theories"**

Tickets available at the door.  
Doors open 7pm.

Whereas Stephen Hawking and Kip Thorne firmly believe that information swallowed by a black hole is forever hidden from the outside universe, and can never be revealed even as the black hole evaporates and completely disappears,

And whereas John Preskill firmly believes that a mechanism for the information to be released by the evaporating black hole must and will be found in the correct theory of quantum gravity,

Therefore Preskill offers, and Hawking/Thorne accept, a wager that:

**When an initial pure quantum state undergoes gravitational collapse to form a black hole, the final state at the end of black hole evaporation will always be a pure quantum state.**

The loser(s) will reward the winner(s) with an encyclopedia of the winner's choice, from which information can be recovered at will.

Stephen W. Hawking, Kip S. Thorne, John P. Preskill  
Pasadena, California, 6 February 1997

It's signed by Thorne and Preskill, with a thumbprint of Hawking's.

The black hole information paradox started in 1967, when Werner Israel showed that the Schwarzschild metric, was the only static vacuum black hole solution. This was then generalized to the no hair theorem: the only stationary rotating black hole solutions of the Einstein-Maxwell equations are the Kerr-Newman metrics. The no hair theorem implied that all information about the collapsing body was lost from the outside region apart from three conserved quantities: the mass, the angular momentum, and the electric charge.

This loss of information wasn't a problem in the classical theory. A classical black hole would last for ever, and the information could be thought of as preserved inside it, but just not very accessible. **However, the situation changed when I discovered that quantum effects would cause a black hole to radiate at a steady rate. At least in the approximation I was using, the radiation from the black hole would be completely thermal, and would carry no information.** So what would happen to all that information locked inside a black hole, that evaporated away, and disappeared completely? **It seemed the only way the information could come out would be if the radiation was not exactly thermal, but had subtle correlations.** No one has found a mechanism to produce correlations, but most physicists believe one must exist. If information were lost in black holes, pure quantum states would decay into mixed states, and quantum gravity wouldn't be unitary.

# Hawking irrt ?

- Gibt auf der Konferenz GR17 in Dublin bekannt, daß er sich geirrt habe und SL nicht Informationen vernichten können
- 30jährige Wette verloren
- Thorne ist noch unentschlossen, möchte sich dem Problem noch widmen

A black hole with a glowing accretion disk and a bright ring of light. The central black hole is dark and surrounded by a bright, glowing ring of light. The surrounding space is filled with blue and purple light, suggesting a high-energy environment. The overall appearance is that of a black hole with a glowing accretion disk and a bright ring of light.

Schwarze Löcher:  
Naked Singularities

# Nackte Singularitäten

- 1996: Theorem/Hypothese von Roger Penrose, daß Singularitäten immer von einem Ereignishorizont umgeben sein müßten. Das Universum verhindere selbst als “kosmischer Zensor” den Blick auf die *Hässlichkeit* einer Singularität.
- Nackte Singularität: bildet sich als Ergebnis eines Gravitations-Kollaps eines massereichen Sterns und ist für einen externen Beobachter sichtbar – im Gegensatz zur Singularität eines SL, was sich hinter dem Ereignishorizont der Gravitation versteckt. Auch: Quanten-Sterne
- In Modellrechnungen: Nackte Singularitäten können entstehen, vorausgesetzt, Druck- Dichte- und Energievoraussetzungen stimmen am Anfang. Der Ereignishorizont entsteht dann nicht früh genug, um die Singularität abzuschirmen.

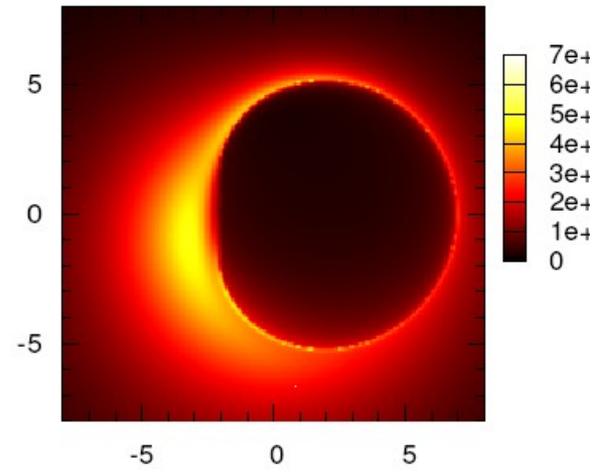
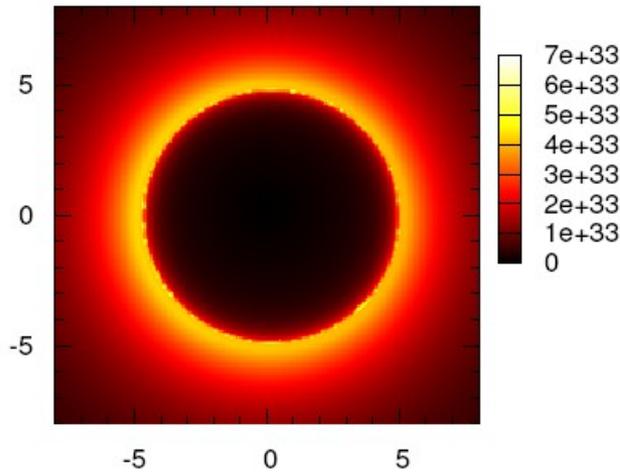
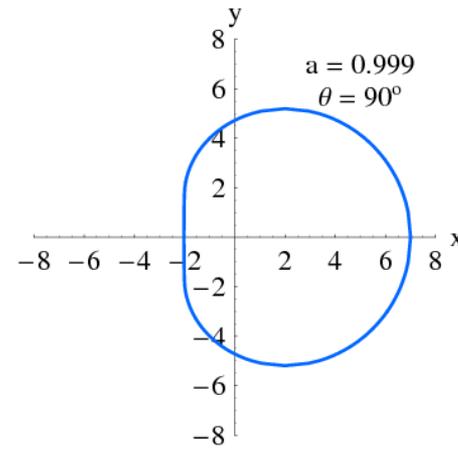
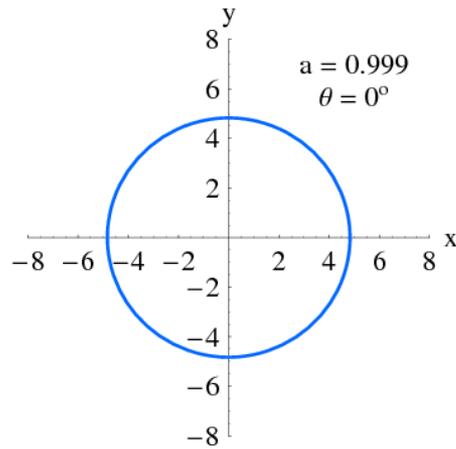
# Nackte Singularitäten

- Wenn ein massereicher Stern kollabiert und es bildet sich ein Ereignishorizont, bevor sich die Singularität bildet, ist das Ergebnis ein Schwarzes Loch, ein permanentes Sternengrab.
- Eine Singularität wäre für eine gewisse Zeit sichtbar – dann kann man der Quantengravitation bei der Arbeit zusehen!!
- Eine nackte Singularität ist durch die Existenz einer Familie von nicht-räumlichen Pfaden in der Raumzeit charakterisiert, die in der Zukunft bei fernen Beobachtern enden und in der Vergangenheit in der Singularität

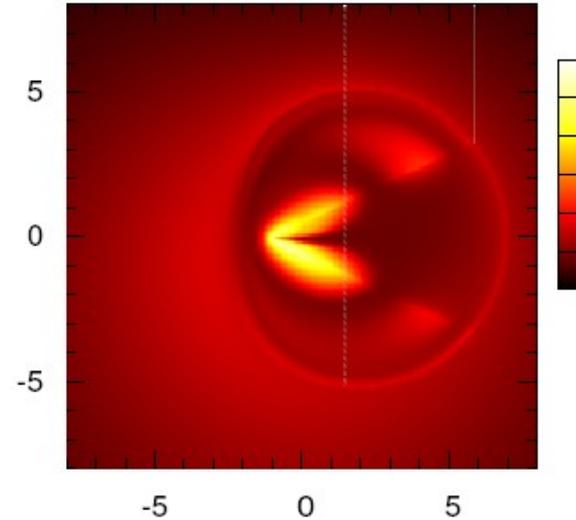
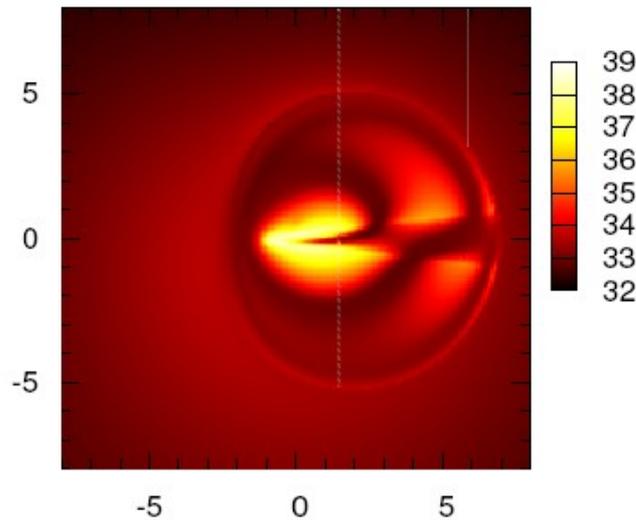
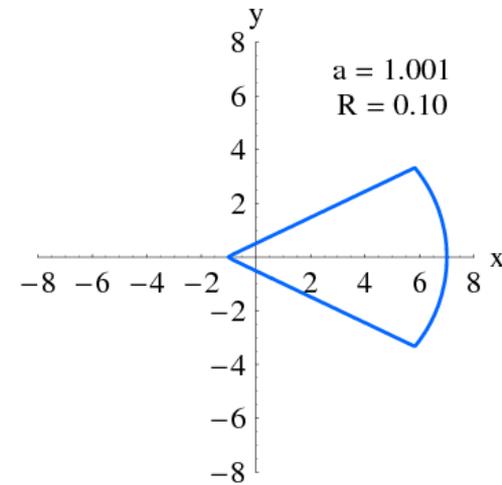
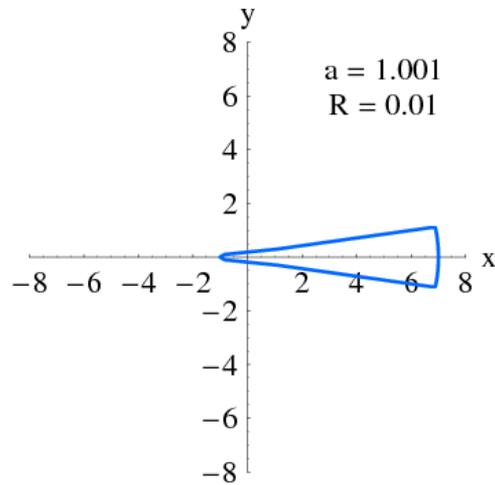
# Nackte Singularitäten

- Warum manche Kosmologen sie nicht mögen: sie zerstören die Verhersagbarkeit in der Raumzeit. Das ganze Universum wäre nicht mehr ausgehend von bestimmten Anfangsdaten in einer konstanten Zeitscheibe komplett berechenbar – dies trifft aber auch aufgrund der SL mit Drehmoment oder Ladung zu – führen zu schwierigen Fragen bzgl. Der Quantengravitation
- Vielen erscheint die Entwicklung zum SL als einzig mögliche Alternative.
- Nackte Singularität im Weltraum erkennen: sind sichtbare, ultradichte Objekte, die deutliche Effekte der Quantengravitation zeigen müssten. Mächtige Schockwellen in der Nähe einer nackten Singularität aufgrund von dort vorhandenen Inhomogenitäten
- Zentrum unserer Milchstraße eine nackte Singularität? Wenn die Rotation stärker ist, als aus der Masse herleitbar, dann könnte es sich um eine nackte Singularität handeln.

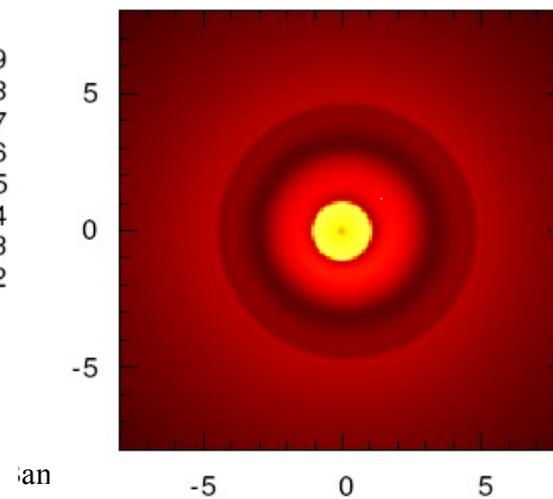
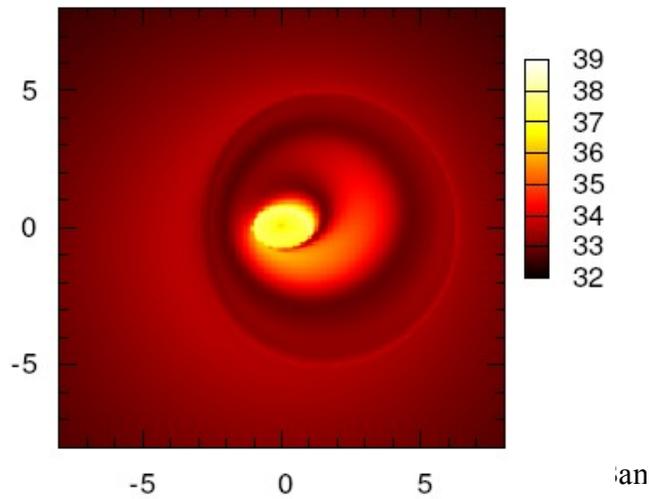
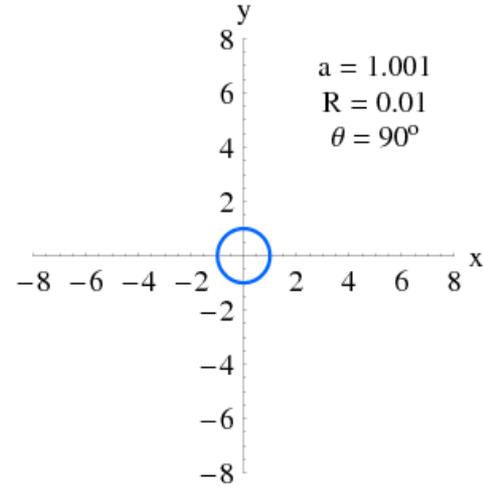
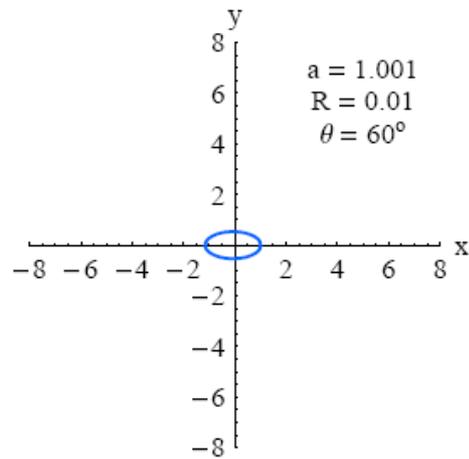
# Direct Image ( $M > |a|$ )



# Direct Image ( $M < |a|$ )



# Direct Image ( $M < |a|$ )



# Nackte Singularitäten

- Stephen Hawking verlor eine Wette bzgl. der Frage, ob nackte Singularitäten innerhalb der ART existieren können, da eine Computersimulation unter der Annahme negativer Energie die Existenzmöglichkeit bewies
- Im Standardmodell der Kosmologie ist der Urknall eine nackte Singularität
- Die physikalische Existenz solcher Singularitäten würde bedeuten, daß es möglich wäre, einen perfekten Gravitationskollaps zu beobachten

# Naked Singularities

- Stellare Kollapse scheinen in der Simulation Nackte Singularitäten produzieren zu können – Materie und Strahlung können sowohl reinfallen als auch rauskommen
- Während der Besuch einer Singularität in einem SL ein One-Way-Trip wäre, könnte man so nah wie man wollte an die Nackte Singularität und zurückkommen und davon erzählen
- Ereignishorizonte sind der leichte Teil des SL – Singularitäten sind mysteriös – ART gilt hier nicht

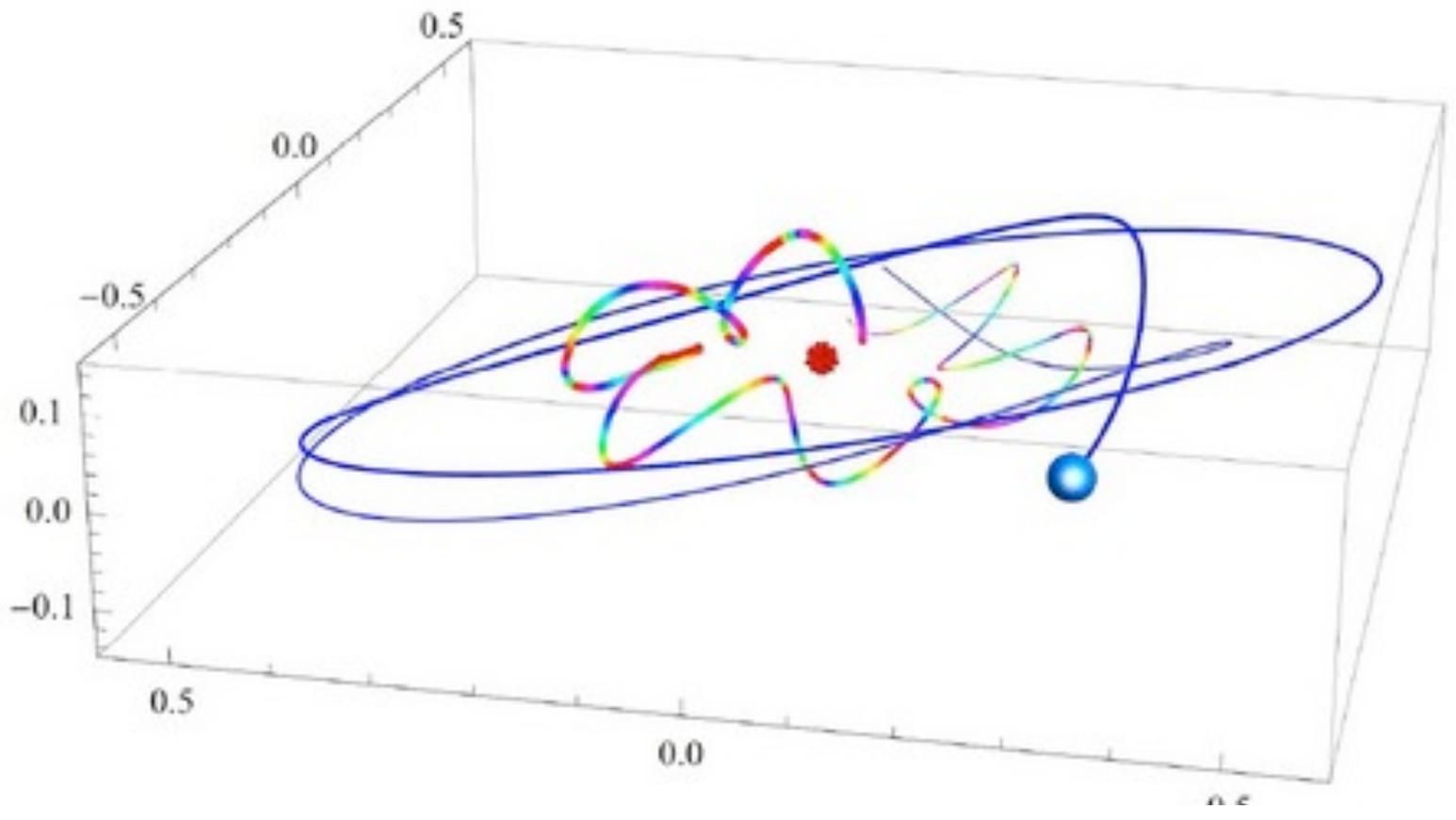
- Naked Singularities – “They are places of magic, where science fails” (S. Joshi)
- The singularity marks the place where the physical world ends. We should think of it as an event rather than an object, a moment when collapsing matter reaches the edge and ceases to be, like the big bang in reverse.
- The singularity is just a moment in time.
- The information paradox might go away, if the horizon goes away....
- Singularities are clothed only if the conditions are suitable.

A black hole with a glowing accretion disk and a dark central event horizon. The accretion disk is composed of swirling blue and purple gas, with bright yellow and orange spots representing hot regions. The central event horizon is a dark, circular region.

Schwarze Löcher: Leben innerhalb  
eines Schwarzen Lochs ?

# Innerhalb des SL ( ??? )

- April 2011: Planeten und entwickeltes Leben könnten innerhalb eines SL existieren. Prof. Vyacheslav Dokuchaev (Russian Academy of Sciences, Moscow)
- Vorherige Theorien vermuteten bereits, daß subatomare Teilchen (Photonen) stabile Orbits innerhalb der SL beschreiben könnten
- Dokuchaev vermutet, daß sogar Planeten mit Leben in den supermassiven SL die Singularität umrunden könnten, ohne zerstört zu werden
- Er untersucht hypothetische Orbits im Bereich zwischen Ereignishorizont und Singularität – konventionelle Bahnen wären nicht möglich, aber einige stabile aber unübliche Spiral-Orbits wären möglich
- Probleme: Enorme Gezeitenkräfte, massive Energiedichten, Probleme mit Kausalitätsargumenten wo die Regeln der Raumzeit nicht mehr funktionieren



# Programm für das Sommersemester 2011

- 29.04. Überblick über die Themen des Semesters
- 13.05. Das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße
- 27.05. Vom Ereignishorizont ins Schwarze Loch
- 17.06. Gravitationswellen & Schwarze Löcher
- 01.07. Urknall – gibt es Alternativen?
- 15.07. Neues vom LHC? Higgs!

außerdem: Japan – Das Erdbeben und die (astronomischen) Auswirkungen